



**Escola Politècnica Superior  
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# **TREBALL DE FI DE CARRERA**

**TÍTOL DEL TFC: Asignación secuencial de canales para tráfico de voz y datos en entornos móviles celulares**

**TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat Telemàtica**

**AUTOR: Pilar Molina Castillo**

**DIRECTOR: Carlos Ramírez Casañas / Sonia Pérez Mansilla**

**DATA:**



**Título:** Asignación secuencial de canales para tráfico de voz y datos en entornos móviles celulares

**Autor:** Pilar Molina Castillo

**Director:** Carlos M. Ramírez Casañas / Sonia Pérez Mansilla

**Data:**

## **Resum**

En el siguiente documento se realizará un estudio sobre diferentes modelos de asignación de time slots (canales) en redes radio, con el fin de conseguir el mayor número consecutivo de time slots libres teniendo en cuenta que los sistemas cursarán tráfico de voz y tráfico de datos.

En la primera parte del trabajo explicaremos el funcionamiento de los cuatro mecanismos de asignación que hemos estudiado basados en un artículo publicado por los directores de este trabajo fin de carrera:

- *Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos sin buffer y sin reserva*
- *Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos con buffer y sin reserva*
- *Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos sin buffer y con reserva de voz*
- *Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos con buffer y con reserva de voz.*

En la segunda parte analizaremos los resultados obtenidos por el script programado para simular cada uno de los modelos y extraeremos conclusiones sobre su funcionamiento.

**Title:** Sequential allocation of channel for voice and data traffic in cellular mobile environment

**Author:** Pilar Molina Castillo

**Director:** Carlos Ramírez Casañas / Sonia Pérez Mansilla

**Date:**

## Overview

In the following document we will make a study of different allocation models of Time slots (channels) in radio networks, with the purpose of obtaining the greater consecutive number of free Time slots considering that the systems will attend traffic of voice and data traffic.

In the first part of this paper we will explain the operation of the four allocation mechanisms that we have studied based on an article published by the directors of this paper:

- *Resource allocation for voice and data traffic without buffer and without reserve.*
- *Resource allocation for voice and data traffic with buffer and without reserve.*
- *Resource allocation for voice and data traffic without buffer and with voice reserve.*
- *Resource allocation for voice and data traffic with buffer and voice reserve.*

In the second part we will analyze the results obtained by script programmed to simulate each one of models and will extract conclusions on its operation.

A mis padres, sin su cariño, esfuerzo y paciencia  
no habría podido llegar hasta aquí. Os quiero.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. GESTIÓN DE RECURSOS RADIO EN REDES HETEROGÉNEAS .....</b>	<b>2</b>
1.1. Fase inicial de acceso.....	3
1.2. Fase de comunicación en curso.....	3
1.3. Problemas de RRM en redes convencionales.....	4
<b>CAPÍTULO 2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS .....</b>	<b>6</b>
2.1. Modelo 1: Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos sin buffer y sin reserva.....	6
2.1.1. Modelo teórico .....	6
2.2. Modelo 2: Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos con buffer y sin reserva.....	11
2.2.1. Modelo teórico .....	11
2.3. Modelo 3: Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos sin buffer y con reserva de voz.....	16
2.3.1. Modelo Teórico.....	16
2.4. Modelo 4: Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos con buffer y reserva de voz.....	23
2.4.1. Modelo Teórico.....	23
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
3.1. Resultados modelo 1 .....	31
3.1.1. Caso 1: $TO_v > TO_d$ .....	32
3.1.2. Caso 1: $TO_v > TO_d$ .....	33
3.1.3. Caso 1: $TO_v = TO_d$ .....	34
3.2. Resultados modelo 2 .....	34
3.2.1. Caso 1: $TO_v > TO_d$ .....	34
3.2.2. Caso 1: $TO_v < TO_d$ .....	36
3.2.3. Caso 1: $TO_v = TO_d$ .....	38
3.3. Resultados modelo 3 .....	40
3.3.1. Caso 1: $TO_v > TO_d$ .....	41
3.3.2. Caso 1: $TO_v < TO_d$ .....	42
3.3.3. Caso 1: $TO_v = TO_d$ .....	43
3.4. Resultados modelo 4 .....	45
3.4.1. Caso 1: $TO_v > TO_d$ .....	45
3.4.2. Caso 1: $TO_v < TO_d$ .....	46
3.4.3. Caso 1: $TO_v = TO_d$ .....	49
<b>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>51</b>

<b>CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE AMBIENTALIZACIÓN .....</b>	<b>52</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>53</b>

## INTRODUCCIÓN

Este TFC forma parte de un amplio proyecto donde se estudian diferentes mecanismos de asignación de los recursos radio en redes móviles celulares, es decir, cómo y de qué forma se asignan cada uno de los canales a los usuarios de esta tecnología.

Nosotros nos centraremos en analizar el funcionamiento y resultados de cuatro modelos en concreto; dos modelos de asignación secuencial, y dos modelos de asignación secuencial con reserva para voz, con el fin de mejorar la eficiencia que el modelo actual de asignación de time slots consigue en las redes móviles celulares.

En primer lugar, presentaremos una breve explicación del entorno móvil en el que se basa este trabajo, donde explicaremos los aspectos más relevantes sobre el funcionamiento de la tecnología radio.

En segundo lugar pasaremos a analizar los diferentes modelos para la asignación de canales que tienen como objetivo conseguir el máximo número de slots libres consecutivos en las tramas GPRS/EDGE.

Los objetivos de este trabajo básicamente son dos; el primero es implementar un script en Matlab que nos permita obtener resultados y el segundo es obtener conclusiones sobre el comportamiento para cada modelo escogido.



## CAPÍTULO 1. GESTIÓN DE RECURSOS RADIO EN REDES HETEROGÉNEAS

Mientras la industria de las comunicaciones móviles actualmente dirige sus esfuerzos hacia el desarrollo y explotación comercial de los sistemas de tercera generación (3G), la comunidad investigadora ha comenzado a trabajar en la definición de los futuros sistemas de cuarta generación (4G). Aunque existen diferentes puntos de vista, el concepto más ampliamente extendido (incluyendo varios proyectos de investigación recientemente llevados a cabo en el contexto de los Programas Marco de la Unión Europea) concibe estos sistemas como la integración y gestión conjunta de los actuales sistemas celulares, no sólo entre sí, sino también con otras tecnologías de acceso radio (*Radio Access Technologies*, RATs) ya existentes o en vías de desarrollo, así como otras nuevas que pudieran surgir en el futuro. Este concepto se basa en la idea de que diferentes redes de acceso radio pueden ser elementos complementarios y cooperantes dentro de una infraestructura radio heterogénea a través de la cual el proveedor de servicios puede satisfacer de la manera más eficiente los diversos niveles de calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS) requeridos en el sistema. Para tal fin, uno de los elementos clave que debe considerar el proveedor de red es la gestión de los recursos radio (*Radio Resource Management*, RRM) de las diversas RATs como si de un único sistema se tratase, con el objetivo de lograr un aprovechamiento óptimo de los recursos radio disponibles y, en definitiva, un uso más eficiente del sistema en su conjunto (ver [2]).

El concepto de RRM es aplicar esquemas para conseguir un uso apropiado de los limitados recursos radio. Dependiendo del sistema considerado los recursos radio pueden ser descompuestos en varias unidades radio básicas (*Radio Resources Units* RRU), por ejemplo un RRU puede ser:

- Una frecuencia portadora.
- Un time slot
- Un código ortogonal
- Una cantidad de potencia

Como resultado, un canal radio es una combinación de una o varios de éstos RRUs y permiten el establecimiento de la comunicación.

En la figura 1.1 observamos un esquema de las principales fases de RRM que describiremos seguidamente.

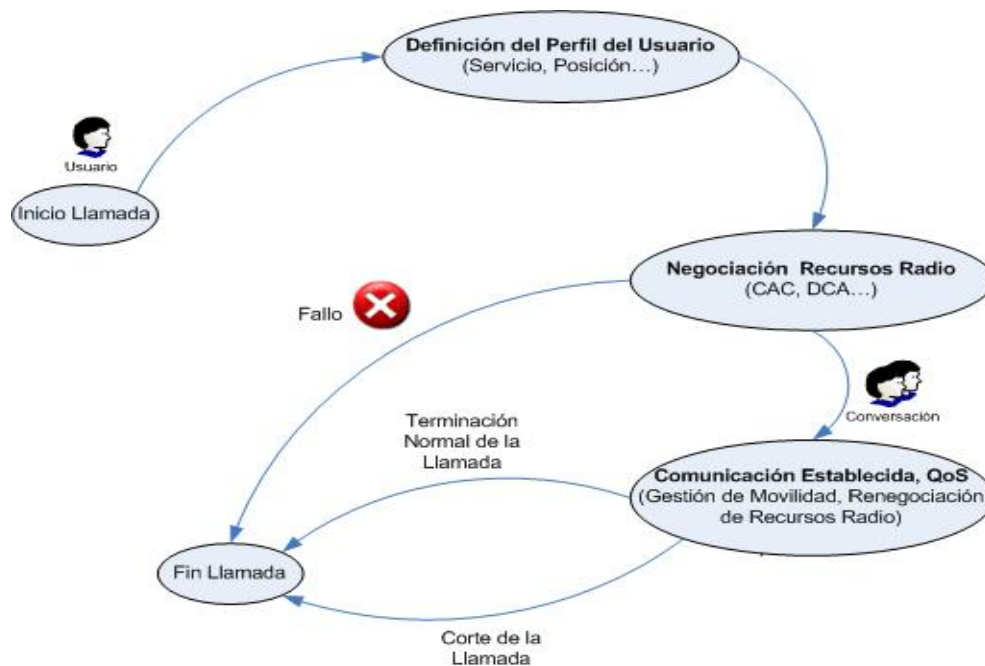


Fig. 1.1. Fases de RRM.

## 1.1. Fase inicial de acceso.

En esta fase inicial se espera que las peticiones de los usuarios sean atendidas de manera justa y con éxito. El usuario solicita un canal radio para establecer una conexión. Sin embargo, al mismo tiempo, muchos otros usuarios pueden también intentar independientemente tener acceso a los recursos de la misma estación base. En este punto es necesario utilizar mecanismo de asignación de recursos que optimicen el reparto de dichos recursos entre los usuarios.

En la fase de acceso el tema más importante que hay que aprontar es el *blocking* o *bloqueo*, que es percibido por el usuario como la imposibilidad de establecer una comunicación. El bloqueo aparece cuando se produce una escasez de RRUs (e.j. portadora o time slots) en la estación base. Para solucionar este problema de bloqueo, RRM ha desarrollado unos esquemas para la renegociación de recursos radio: *Call Admisión Control* (CAC).

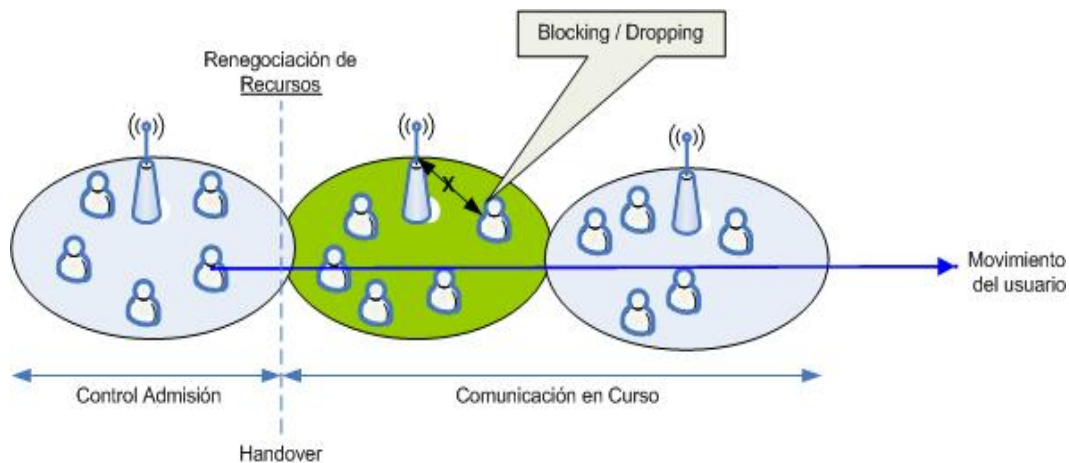
## 1.2. Fase de comunicación en curso.

Una vez se ha establecido con éxito la conexión durante la fase inicial de acceso surgen el problema de la movilidad del usuario entre células (fig 1.2). Los principales fenómenos ligados a la movilidad son los siguientes.

- *Blocking*. Principalmente debido al movimiento a través de las diferentes células de la red móvil. EL usuario se desplaza y se dispone a dejar la célula donde se ha establecido la conexión actual. Por lo tanto, se ha de establecer una re-negociación de RRUs para poder establecer una nueva conexión con la célula vecina para asegurar la continuidad de la comunicación con el mismo QoS (*handover*). Mientras se produce la

renegociación, varios usuarios pueden intentar iniciar una conexión en la célula donde se ha producido el handover y encontrarse con todos los recursos ocupados produciéndose el bloqueo. Existen mecanismos que permiten anticiparse al handover y previamente reservar los recursos necesarios.

- *Dropping*. Aparece cuando una comunicación establecida se corta. La escasez de recursos no tiene porque ser la principal razón de este fenómeno, también es posible que calidad de comunicación establecida se degrade durante un cierto periodo de tiempo que termine cortando la conexión. Diferentes estrategias de re-negociación son necesarias para solucionar este problema.
- *Bad Quality Call*. Aparece cuando una ráfaga de errores degrada o dificulta el mantenimiento de la comunicación sin llegar a cortar la comunicación. Por lo tanto, los esquemas RRM también son necesarios para superar estas situaciones.



**Fig.1.2** Fase de comunicación en curso.

### 1.3. Problemas de RRM en redes convencionales.

En sistemas de comunicaciones radio, los problemas típicos relacionados con las políticas de asignación de recursos son:

- Se han de satisfacer las peticiones de los usuarios de la manera justa.
- Los recursos radio se deben distribuir entre todos los usuarios que pertenecen a la misma clase de servicio de manera justa.
- La complejidad ha de ser la menor posible.

Dependiendo de la manera que se manejen estas tres condiciones se pueden diseñar diversas políticas de funcionamiento. Además del mecanismo CAC comentado anteriormente para la fase inicial de acceso, la disciplina de colas y el scheduling son otros mecanismos para mejorar las políticas RRM. La finalidad del scheduling es determinar que clase de servicio ha de ser atendida primero y que clase de servicio se procesará después. Para una determinada clase de servicio, la disciplina de colas tiene como objetivo determinar el orden en que el servidor seleccionará los usuarios para ser procesados primero y cual será procesado en segundo lugar. Dependiendo de las características del

sistema, se pueden utilizar diversos esquemas: al azar, el primero de la cola es el primero en servirse (*First In First Out* FIFO), el último de la cola es el primero en servirse (*Last In First Out* LIFO) son algunos ejemplos.

En sistemas de comunicaciones móviles se han propuesto diversas estrategias para la asignación de canales:

- Asignación fija de canales (*Fixed Channel Allocation* FCA) proporciona un determinado número de RRU para cada celda.
- Asignación dinámica de canales (*Dynamic Channel Allocation* DCA) proporciona un determinado número de RRU para cada celda y un grupo de RRU para compartir entre diferentes celdas.

En el siguiente punto de este trabajo explicaremos los diferentes mecanismos de asignación dinámica de canales que hemos estudiado.

## CAPÍTULO 2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS

### 2.1. Modelo 1: Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos sin buffer y sin reserva.

En este modelo tendremos en cuenta dos tipos de tráficos: voz y datos. Suponemos que los tiempos entre llamadas son independientes y el número de llegadas siguen una distribución de Poisson con tasa  $\lambda_d$  para el tráfico de datos y  $\lambda_v$  para el tráfico de voz, además suponemos también que las llamadas se sirven siguiendo una distribución exponencial negativa con tasa  $1/\mu_d$  para el tráfico de datos y  $1/\mu_v$  para el tráfico de voz.

#### 2.1.1. Modelo teórico

El sistema estará compuesto por  $n$  time slots, numerados del 0 al  $n-1$ , donde podrá haber tanto tráfico de voz como tráfico de datos. El mecanismo de asignación será secuencial de manera que cuando llegue tráfico de voz éste ocupará el time slot con el número de identificador (ID) menor que esté vacío. En caso de que el tráfico sea de datos, éste ocupará el primer time slot vacío con el ID mayor tal y como se observa en la figura 2.1. Si todos los time slots están ocupados y llega tráfico de voz o tráfico de datos éste se perderá.



Fig.2.1. Ejemplo de un sistema con 3 time slots

Cada time slot puede estar libre, tener datos o voz. Teniendo en cuenta que hay tres estados posibles y que nuestro sistema tendrá  $n$  time slots, el total de estados posibles será:

$$\text{Número de estados} = 3^n \quad (2.1)$$

Una vez que ya conocemos el número de estados del sistema, el siguiente paso consiste en la generación de una matriz donde estén representados todos los estados de manera ordenada. En este caso, hemos enumerado los estados en base 3 de la siguiente manera: *num\_estado* -> *valor en base 3*. En la figura 2.2 observamos un ejemplo donde están representados los estados de un sistema de 3 time slots:

0 -> 000	6 -> 020	12 -> 110	18 -> 200	24 -> 220
1 -> 001	7 -> 021	13 -> 111	19 -> 201	25 -> 221
2 -> 002	8 -> 022	14 -> 112	20 -> 202	26 -> 222
3 -> 010	9 -> 100	15 -> 120	21 -> 210	
4 -> 011	10 -> 101	16 -> 121	22 -> 211	
5 -> 012	11 -> 102	17 -> 122	23 -> 212	

fig. 2.2. Estados para un sistema con 3 time slots.

Donde los time slots que contienen el valor 1 representan aquellos time slots que están ocupados por tráfico de datos y los que contienen el valor 2 representan time slots ocupados por tráfico de voz. Teniendo en cuenta esta notación, el tráfico de voz lo representaremos con una V y el tráfico de datos con una D con el fin de representar los estados de una manera más natural.

Para poder definir las ecuaciones de transición de estados utilizamos cadenas de Markov. Una cadena de Markov es un grafo donde se representa un sistema donde varía su estado a lo largo del tiempo, siendo cada cambio una transición del sistema. En la figura 2.3 podemos ver las transiciones correspondientes al estado 5 (0DV).

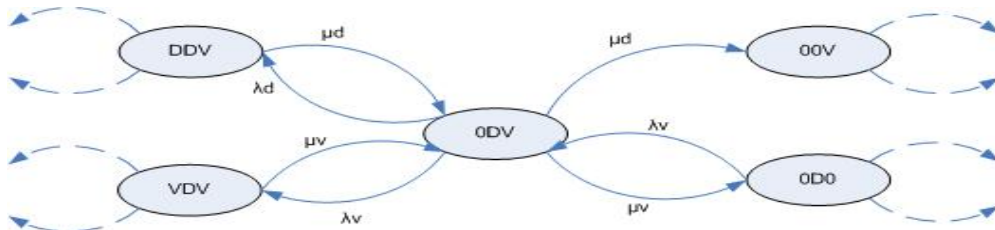


Fig. 2.3. Segmento de cadena de Markov para el estado 0DV.

A partir de la figura 2.3 podemos definir la ecuación de transición para este estado de la siguiente manera:

$$-\lambda_v \cdot P_{0D0} + (\mu_d + \mu_v + \lambda_d + \lambda_v) \cdot P_{0DV} - \mu_d \cdot P_{DDV} - \mu_v \cdot P_{VDV} = 0 \quad (2.2)$$

Los términos positivos, nos indican los estados a los que podemos ir dependiendo de si alguna llamada finaliza o si se produce una nueva llegada. Las finalizaciones posibles dependen del número de time slots ocupados. En las ecuaciones que veremos a lo largo de este trabajo  $i_{rv}$  representará el número de time slots ocupados por tráfico de voz e  $i_{rd}$  representará el número de time slots ocupados por tráfico de datos. En este caso sólo puede finalizar el time slot ocupado por tráfico de datos o de voz. Las llegadas dependen del número de time slots libres, en nuestro ejemplo tenemos un time slot libre que puede ser ocupado por un tráfico de voz o por un tráfico de datos.

Los términos negativos nos indican los estados de los que puede provenir el estado objeto de estudio. En el caso que haya un time slot libre, como en nuestro ejemplo, este estado puede provenir de un estado anterior donde ese time slot estuviera ocupado por tráfico de voz o tráfico de datos y que éste hubiera finalizado, convirtiéndose así en el estado objeto de estudio. En

algunos casos también será posible que el estado actual provenga de un estado donde el time slot ocupado actualmente hubiese estado libre, para ello definiremos  $k_{rv}$  como el número de time slots ocupados consecutivamente por tráfico de voz o datos empezando a contar desde el time slot número 0 y  $k_{rd}$  como el número de time slots ocupados consecutivamente por tráfico voz o datos empezando a contar desde el time slot número  $n-1$ . Por ejemplo, sea el estado DVVOVOD donde  $k_{rv}=1$  y  $k_{rd}=3$  este estado puede provenir del estado OVVOVOD y que se produjera una llegada de datos ya que el time slot con mayor ID está ocupado por datos, pero no puede provenir del estado DVVOVOO y que se produjera una llegada de datos ya que se convertiría en el estado DVVDVOO.

La cadena de Markov que representa todos los estados posibles para un sistema con 2 time slots, la podemos observar en la figura 2.4. A partir de esta cadena obtenemos las ecuaciones de transición para todos los estados posibles.

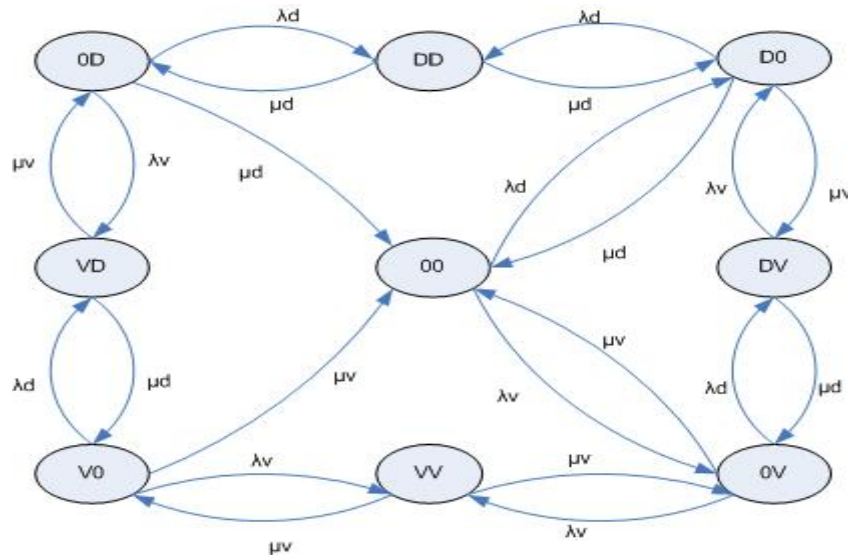


Fig. 2.4. Cadena de Markov con 2 time slots.

Todas las ecuaciones de transición de estado para este modelo se pueden resumir en la ecuación (2.3) (ver [1]).

$$\begin{aligned}
 & \left[ b(i_{rd} + i_{rv} < n) \cdot \lambda_v + b(i_{rd} + i_{rv} < n) \cdot \lambda_d + (i_{rv} \cdot \mu_v) + (i_{rd} \cdot \mu_d) \right] \cdot P(r) = \\
 & b(i_{rv} + i_{rd} < n) \cdot \left[ \mu_v \cdot \sum_{\substack{j=krv \\ j/rj=0}}^{n-1-krd} P(r + 3^j \cdot 2) + \mu_d \cdot \sum_{\substack{j=krv \\ k/rj=0}}^{n-1-krd} P(r + 3^j) \right] + \\
 & + b(k_{rd} > 0) \cdot \lambda_d \cdot \sum_{\substack{j=n-krd \\ j/rj=1}}^{n-1} P(r - 3^j) + b(k_{rv} > 0) \cdot \lambda_v \cdot \sum_{\substack{j=0 \\ j/rj=2}}^{krv-1} P(r - 3^j \cdot 2)
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Donde  $b()$  es una expresión booleana. En caso de que la condición que hay entre paréntesis se cumpla  $b$  valdrá 1, si la condición no se cumple  $b$  toma por

valor 0.  $k_{rv}$  expresa el número de time slots ocupados consecutivamente por tráfico de voz o tráfico de datos empezando a contar desde el time slot número 0 y  $k_{rd}$  expresa el número de time slots ocupados consecutivamente por un tráfico voz o un tráfico de datos empezando a contar desde el time slot número  $n-1$ .

Una vez tenemos todas las ecuaciones, construimos la matriz de transición de estados que llamaremos *Matriz A*. En la figura 2.5 podemos ver un ejemplo de matriz A para un sistema con 2 time slots, donde cada fila indica los valores correspondientes a cada ecuación de estado, a excepción de la última fila en la que todos sus valores son unos, con la finalidad de asegurar que la suma de las probabilidades sea 1. Podemos suprimir una fila de ecuaciones y sustituirla por una fila de unos porque las ecuaciones de transición en una cadena de Markov son linealmente dependientes y por tanto podemos prescindir de una de ellas, en este caso de la última.

$$\text{Matriz A} = \begin{pmatrix} \lambda_v + \lambda_d & -\mu_d & -\mu_v & -\mu_d & 0 & 0 & -\mu_v & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_d & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 & -\mu_v & 0 \\ -\lambda_v & 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_v & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 & -\mu_v \\ -\lambda_d & 0 & 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_d & -\mu_d & -\mu_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_d & 0 & -\lambda_v & -2\mu_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_d & -\lambda_v & 0 & \mu_v + \mu_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_v & -\mu_d & -\mu_v \\ 0 & -\lambda_v & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_d & \mu_v + \mu_d & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Fig. 2.5. Matriz A para un sistema de 2 time slots.

Definimos también una matriz de valores independientes que llamamos BM, que tendrá las mismas filas que la matriz A pero sólo una columna, donde el último término será 1 (fig. 2.6). Éste último término tendrá como valor 1 por la misma razón que la última fila de la matriz A es toda unos, para forzar que la suma de probabilidades sea 1.

$$\text{BM} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)^T$$

Fig. 2.6. Matriz de valores independientes

Por último creamos una matriz P. En esta matriz se guardarán las probabilidades de cada estado, por lo tanto la matriz P ha de tener tantas filas como estados posibles. Para nuestro ejemplo anterior la matriz sería tal y como se observa en la figura 2.7.

$$\text{P} = (\text{P}_1 \ \text{P}_2 \ \text{P}_3 \ \text{P}_4 \ \text{P}_5 \ \text{P}_6 \ \text{P}_7 \ \text{P}_8 \ \text{P}_9)^T$$

Fig. 2.7. Matriz de probabilidad de estados.

Una vez tenemos estas tres matrices definidas, aplicamos la ecuación 2.4 para resolver el sistema de ecuaciones, obteniendo de esta manera los valores para cada probabilidad de estado en la matriz P.



$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{P} = \mathbf{B}\mathbf{M}$$

**(2.4)**

## 2.2 Modelo 2: Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos con buffer y sin reserva.

### 2.2.1 Modelo teórico

Este sistema estará compuesto por  $n$  time slots que podrán ocuparse por tráfico de voz o tráfico de datos. El mecanismo de asignación es similar al anterior, el tráfico de voz ocupará los time slots con el número de identificador (ID) menor que estén libres. En caso de que el tráfico sea de datos, éste ocupará el primer time slot libre con el ID mayor. El tráfico de voz que llegue a nuestro sistema y se encuentre todos los time slots ocupados se perderá, en cambio, si el tráfico de datos se encuentra los  $n$  time slots ocupados éste pasará a ocupar la primera posición libre del buffer. El buffer tendrá  $q$  posiciones, tal y como podemos observar en la figura 2.8, y seguirá una disciplina *First In First Out* (FIFO), esto significa que el primer segmento de datos que llegue al buffer ocupará la primera posición libre de la cola y será el primero en servirse cuando un time slot se libere, independientemente que este time slot estuviese ocupado por datos o voz, el segundo segmento del buffer será el segundo en servirse y así sucesivamente.

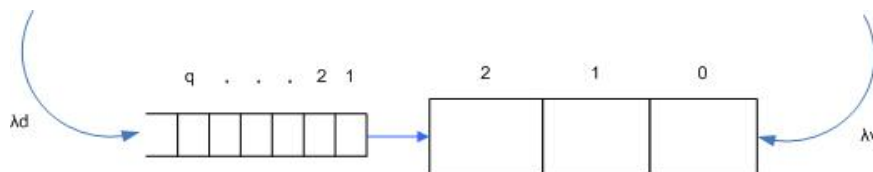


Fig. 2.8. Sistema con 3 time slots y  $q$  posiciones de buffer

Cuando no hay datos el buffer, la situación de un único time slot es el siguiente: libre, tener datos o voz, por lo tanto son 3 los estados posibles cuando el buffer esta libre. En cambio, cuando hay tráfico de datos esperando en el buffer a ser servido, inevitablemente todos los time slots han de estar previamente ocupados, por tanto hay dos estados posibles para un time slot: estar ocupado por tráfico de datos o por tráfico de voz. Teniendo en cuenta las condiciones anteriores y que nuestro sistema tendrá  $n$  time slots y  $q$  posiciones en el buffer, el total de estados posibles será:

$$\text{Número de estados} = 3^n + 2^n \cdot q \quad (2.5)$$

La matriz de estados de este modelo constará de dos partes. La parte correspondiente al buffer vacío que estará escrita en base 3 de la siguiente manera:

Num\_estado  $\rightarrow$  0, valor en base 3

La parte en la que el buffer tiene una o más posiciones ocupadas que estará escrita en base dos, con la peculiaridad de que los valores que emplearemos no serán 0 y 1, sino 1 y 2 tal y como representa el siguiente esquema:

Num\_estado -> posiciones ocupadas del buffer, valor en base 2

De manera que ahora los estados posibles para un sistema con 2 time slots y 1 posición en el buffer son las que observamos en la figura 2.9, donde el primer término separado por una coma nos indica las posiciones ocupadas del buffer

0 -> 0,00	3 -> 0,10	6 -> 0,20	9 -> 1,11	12 -> 1,22
1 -> 0,01	4 -> 0,11	7 -> 0,21	10 -> 1,12	
2 -> 0,02	5 -> 0,12	8 -> 0,22	11 -> 1,21	

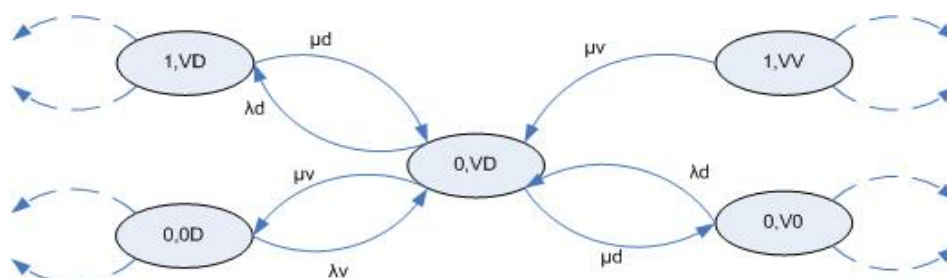
**Fig. 2.9.** Estados para un sistema con 2 time slots y una posición de buffer.

Al igual que en el punto anterior, los time slots que contienen el valor 1 representan aquellos time slots que están ocupados por tráfico de datos y los que contienen el valor 2 representan time slots ocupados por tráfico de voz. Teniendo en cuenta esta notación, el tráfico de voz lo representaremos con una V y el tráfico de datos con una D con el fin de representar los estados de una manera más natural.

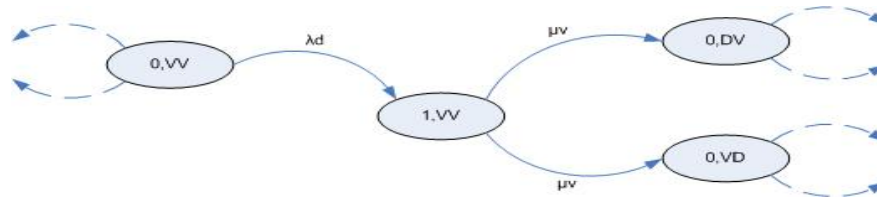
Llegados a este punto pasaremos a representar, utilizando diagramas de Markov, algunos estados de un sistema compuesto por 2 time slots y una única posición de buffer para poder definir las ecuaciones de transición de estado.

Si todos los time slots están ocupados y se produce una llegada de tráfico de datos, este tráfico pasaría a ocupar la primera posición libre del buffer, si la llegada es de tráfico de voz se perdería. En caso de que se liberara el time slot ocupado por tráfico de datos o por tráfico de voz, el tráfico de datos que está en el buffer pasaría a ocupar el time slot liberado.

En la figura 2.10 observamos la representación del estado 8 en decimal (0, VD), donde todos los time slots están ocupados y el buffer está libre y en la figura 2.11 se muestra la representación del estado 12 en decimal (1, VV), donde el buffer y los time slots están ocupados



**Fig. 2.10.** Estado 8 de un sistema con 2 time slots y 1 posición de buffer.



**Fig. 2.11.** Estado 12 de un sistema con 2 time slots y 1 posición de buffer.

A partir de éstas dos figuras podemos definir las ecuaciones de transición para el estado 0,VD y el estado 1,VV respectivamente:

$$\begin{aligned}
 -\lambda_v \cdot P_{0,0D} - \lambda_d \cdot P_{0,V0} + (\mu_v + \mu_d + \lambda_d) \cdot P_{0,VD} - \mu_d \cdot P_{1,VD} - \mu_v \cdot P_{1,VV} &= 0 \\
 -\lambda_d \cdot P_{0,VV} + 2 \mu_v \cdot P_{1,VV} &= 0
 \end{aligned}$$

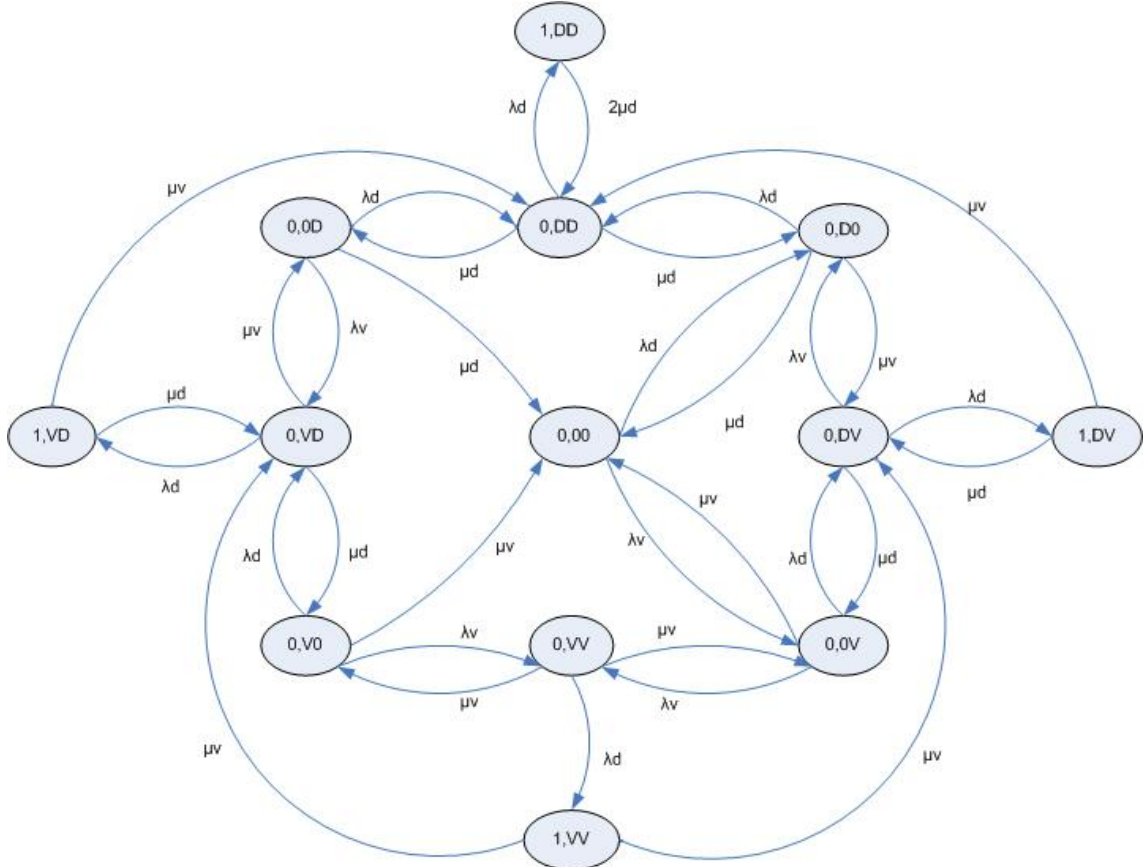
(2.6)

Los términos positivos, nos indican los estados a los que podemos ir dependiendo de si alguna llamada finaliza o si se produce una nueva llegada. Las finalizaciones posibles dependen del número de time slots ocupados y las llegadas dependen del número de time slots libres y de las posiciones libres en el buffer. En caso de que se produzca una llegada de tráfico de voz y se encuentre algún time slot libre, ésta ocupará el time slot con ID menor que se encuentre libre, si se produce una llegada de tráfico de datos y se encuentra un time slot libre, ésta ocupará el time slot con ID mayor que se encuentre libre.

Los términos de las ecuaciones con signo negativo nos indican los estados de los que puede provenir el estado objeto de estudio. En el caso que haya un time slot libre, este estado puede provenir de un estado anterior donde ese time slot estuviera ocupado por tráfico de voz o tráfico de datos y que éste hubiera finalizado, convirtiéndose así en el estado objeto de estudio. En algunos casos también será posible que el estado actual provenga de un estado donde el time slot ocupado actualmente hubiese estado libre, para ello definiremos  $k_{rv}$  como el número de time slots ocupados consecutivamente por tráfico de voz o datos empezando a contar desde el time slot número 0 y  $k_{rd}$  como el número de time slots ocupados consecutivamente por tráfico voz o datos empezando a contar desde el time slot número n-1. Un dato también puede provenir del buffer cuando se libere un elemento de voz o datos en esa posición.

En el caso de que todos los time slots estuviesen ocupados y se produjera una llegada de voz, ésta se perdería, si la llegada procede de tráfico de datos dependerá del estado del buffer. Si quedan posiciones libres en el buffer el tráfico de datos pasará a ocupar la primera posición libre en la cola, si están todas las posiciones del buffer ocupadas, las unidades de datos se perderán. Si hay alguna posición ocupada en el buffer y se libera un time slot, el primer segmento de datos que está en el buffer pasaría a ocupar el time slot liberado.

La cadena de Markov que representa todos los estados posibles para un sistema con 2 slots y una única posición de buffer la podemos observar en la figura 2.12. A partir de esta cadena obtenemos las ecuaciones de transición para cada estado.



**Fig. 2.12.** Cadena de Markov con 2 time slots y 1 posición de buffer

Todas las ecuaciones de transición de estados para este modelo se pueden resumir dos ecuaciones. Con la ecuación 2.7 calculamos las ecuaciones de transición cuando el buffer esta libre, que corresponden a los estados numerados en base 3 (ver [1]).

$$\begin{aligned}
 & \left[ b(i_{rd} + i_{rv} < n) \cdot \lambda_v + \lambda_d + (i_{rv} \cdot \mu_v) + (i_{rd} \cdot \mu_d) \right] \cdot P(r) = \\
 & = b(i_{rv} + i_{rd} < n) \cdot \left[ \mu_v \cdot \sum_{\substack{j=krv \\ j/rj=0}}^{n-1-krd} P(r + 3^j \cdot 2) + \mu_d \cdot \sum_{\substack{j=krv \\ k/rj=0}}^{n-1-krd} P(r + 3^j) \right] + \\
 & + b(k_{rd} > 0) \cdot \lambda_d \cdot \sum_{\substack{j=n-krd \\ j/rj=1}}^{n-1} P(r - 3^j) + b(k_{rv} > 0) \cdot \lambda_v \cdot \sum_{\substack{j=0 \\ j/rj=2}}^{krv-1} P(r - 3^j \cdot 2) + \\
 & + b(i_{rv} + i_{rd} = n) \cdot \left[ \mu_v \cdot \sum_{\substack{j=0 \\ j/rj=1}}^{n-1} P(3^n + \sum_{i=0}^{n-1} (r-1) \cdot 2^i + 2^j) + \mu_d \cdot \sum_{\substack{j=0 \\ j/rj=1}}^{n-1} P(3^n + \sum_{i=0}^{n-1} (r-1) \cdot 2^i) \right]
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

En la ecuación 2.8 obtenemos las ecuaciones de transición en caso de que el buffer contenga tráfico de datos, que corresponden a los estados numerados en base 2 (ver [1]).

$$\begin{aligned}
 & \left( b(B < q) \cdot \lambda_d + i_{rd} \cdot \mu_d + i_{rv} \cdot \mu_v \right) \cdot P(r) = \\
 & = b(B > 1) \cdot \lambda_d \cdot P(r - 2^n) + b(B = 1) \cdot \lambda_d \cdot P\left(\sum_{i=0}^{n-1} r_i \cdot 3^i\right) + \\
 & + b(B < q) \cdot \left[ \mu_d \cdot \sum_{\substack{j=0 \\ j/r_j=1}}^{n-1} P(r + 2^n) + \mu_v \cdot \sum_{\substack{j=0 \\ j/r_j=1}}^{n-1} P(r + 2^n + 2^j) \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

Donde  $B$  corresponde al número de posiciones ocupadas del buffer por tráfico de datos y  $q$  corresponde al tamaño del buffer.

Una vez tenemos todas las ecuaciones, construimos la matriz de transición de estado (*Matriz A*). En la figura 2.13 podemos ver un ejemplo de matriz  $A$  para un sistema con 2 time slots y buffer con una única posición, donde cada fila indica los valores correspondientes a cada ecuación de estado, a excepción de la última fila en la que todos sus valores son unos, con la finalidad de provocar que la suma de las probabilidades sea 1.

$$\text{Matriz A} = \begin{pmatrix}
 \lambda_v + \lambda_d & -\mu_d & -\mu_v & -\mu_d & 0 & 0 & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_d & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\lambda_v & 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_v & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\lambda_d & 0 & 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_d & -\mu_d & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -\lambda_d & 0 & -\lambda_d & \lambda_d + 2\mu_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu_d & -\mu_v & -\mu_v & 0 \\
 0 & 0 & -\lambda_d & -\lambda_v & 0 & -\lambda_d + \mu_v + \mu_d & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & -\mu_v \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_v & -\mu_d & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -\lambda_v & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_d & -\lambda_d + \mu_v + \mu_d & 0 & 0 & 0 & -\mu_d & -\mu_v \\
 0 & 0 & -\lambda_v & 0 & 0 & 0 & -\lambda_v & 0 & \lambda_d + 2\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_d & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\mu_d & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_d & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_d + \mu_v & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_d & 0 & 0 & 0 & \mu_d + \mu_v & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1
 \end{pmatrix}$$

**Fig. 2.13.** Matriz  $A$  para un sistema de 2 time slots y una posición de buffer

Una vez calculada la matriz  $A$ , donde cada fila contendrá los valores dependientes de cada ecuación de transición a excepción de última fila donde todos los valores serán unos, definimos la matriz valores independientes BM. La matriz  $BM$  tantas filas como estados tenga el sistema y una única columna. Por último creamos una matriz  $P$ , donde guardaremos las probabilidades de cada estado y aplicaremos la expresión 2.4 para resolver el sistema de ecuaciones.

## 2.3 Modelo 3: Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos sin buffer y con reserva de voz.

### 2.3.1 Modelo Teórico.

Este modelo estará compuesto por  $n$  time slots, de los cuales  $m$  time slots estarán reservados para tráfico de voz y  $n-m$  time slots estarán compartidos tanto para tráfico de datos como para tráfico de voz (ver [4]). A diferencia de los modelos anteriores, los IDs para estados compartidos los numeraremos del 1 al  $n-m$  y los IDs para los reservados los numeraremos del  $n-m+1$  al  $n$ . En la figura 2.14 observamos un ejemplo de un sistema con  $n$  time slots:  $m$  de reserva y  $n-m$  compartidos.

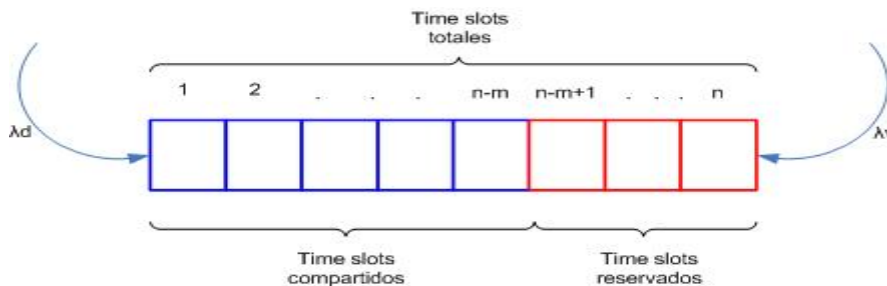


Fig. 2.14. Ejemplo de sistema con 1 time slot de reserva y 2 time slots compartidos

El tráfico de datos que llegue al sistema ocupará el time slot compartido con ID menor que se encuentre libre pero nunca podrá ocupar un time slot reservado, en caso de que todos los  $n-m$  time slots compartidos estén ocupados este tipo de tráfico se perderá.

El tráfico de voz que llegue al sistema y se encuentre alguno de los  $n$  time slots libres, ocupará el time slot con identificador mayor que se encuentre libre. Debemos resaltar que en el momento en el que quede libre un time slot reservado, se producirá un traspaso en la misma celda (*intra-cell handover*) y la unidad de voz que estaba en el time slot compartido con ID menor pasará a ocupar el time slot reservado que acaba de quedar libre. En caso de que el tráfico de voz se encuentre los  $n$  time slots ocupados, éste se perderá.

Para este modelo el total de estados posibles será:

$$\text{Número de estados} = 3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m}$$

(2.9)

El criterio que hemos seguido para numerar los estados de este sistema es el siguiente: los primeros  $2^n - 2^{n-m}$  estados no tienen todos los  $m$  time slots reservados ocupados, como mínimo siempre habrá un time slot reservado libre. En tal caso los time slots reservados sólo podrán estar libres o tener voz, de manera que fijamos el valor de los time slots reservados y escribiremos en base 2 los time slots compartidos. En la figura 2.15 observamos un ejemplo de los primeros  $2^n - 2^{n-m}$  con un sistema de 4 time slots: 2 time slots de reserva y 2 time slots compartidos.

1 -> 0000	5 -> 0002	9 -> 0020
2 -> 0100	6 -> 0102	10 -> 0120
3 -> 1000	7 -> 1002	11 -> 1020
4 -> 1100	8 -> 1102	12 -> 1120

Fig. 2.15. Estados desde el 1 hasta el  $2^n - 2^{n-m}$

Los estados que van desde el  $2^n - 2^{n-m} + 1$  hasta el  $3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m}$  siempre tendrán los  $m$  time slots reservados ocupados, por lo que cada time slot compartido podrá tener 3 posibles estados: libre, tener tráfico de datos o tráfico de voz. Para numerar estos estados lo que haremos será numerar los time slots compartidos en base, tal y como observamos en la figura 2.16 siguiendo con el ejemplo anterior.

13 -> 0022	16 -> 1022	19 -> 2022
14 -> 0122	17 -> 1122	20 -> 2122
15 -> 0222	18 -> 1222	21 -> 2222

Fig. 2.16. Estados desde el  $2^n - 2^{n-m} + 1$  hasta el  $3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m}$

Una vez que ya hemos numerado los estados de nuestro sistema pasaremos a representar, a modo de ejemplo, algunos estados utilizando diagramas de Markov, de esta manera definiremos las ecuaciones de transición.

En la figura 2.17 observamos representado el estado 7 (D00V) donde hay un time slot compartido y un time slot reservado libre, si llega tráfico de datos ocupará un time slot compartido y si llega tráfico de voz ocupará un time slot de reserva.

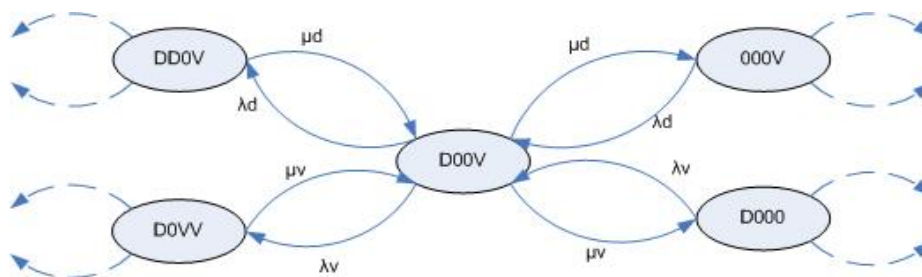


Fig. 2.17. Representación del estado D00V.

En la figura 2.18 representamos el estado 16 (D0VV). En este estado encontramos un time slot compartido libre y todos los time slots de reserva



ocupados, lo que quiere decir que tanto si llega tráfico de voz o tráfico de datos, ocuparán el time slot compartido que se encuentra libre. Además podremos ver que el estado objeto de estudio puede provenir de un estado donde se produce un traspaso, si en el estado  $DVVV$  se libera algún time slot ocupado por voz, la voz que ocupa el time slot compartido pasaría a ocupar el time slot reservado que acaba de quedar libre.

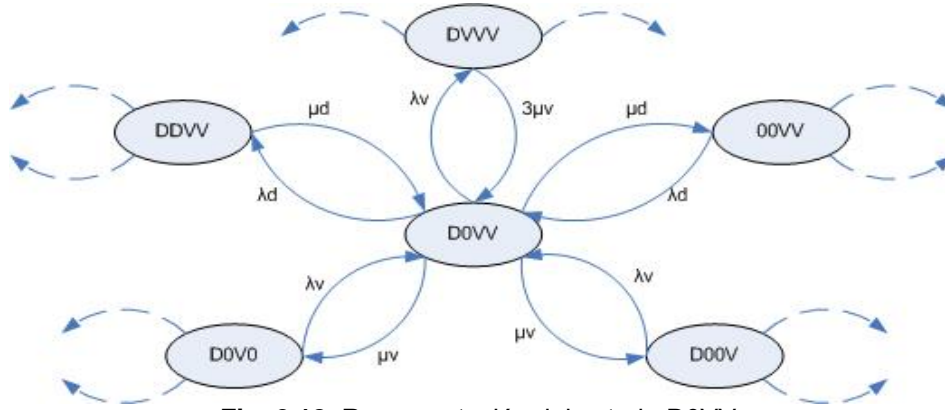


Fig. 2.18. Representación del estado D0VV.

En la figura 2.19 representamos el estado 21 ( $VVVV$ ), donde todos los time slots están ocupados por tráfico de voz.



Fig. 2.19. Representación del estado VVVV.

A partir de estas figuras (2.17, 2.18 y 2.19), podemos definir las ecuaciones de transición<sup>1</sup> para los estados D00V, D0VV y VVVV respectivamente:

$$\begin{aligned}
 & -\lambda_v \cdot P_{D000} - \lambda_d \cdot P_{000V} + (\mu_d + \mu_v + \lambda_d + \lambda_v) \cdot P_{D00V} - \mu_d \cdot P_{DD0V} - \mu_v \cdot P_{D0VV} = 0 \\
 & -\lambda_v \cdot P_{D00V} - \lambda_v \cdot P_{D0V0} - \lambda_d \cdot P_{00VV} - \mu_d \cdot P_{DDVV} + (2\mu_v + \mu_d + \lambda_d + \lambda_v) \cdot P_{D0VV} - 3\mu_v \cdot P_{DVVV} = 0 \\
 & -\lambda_v \cdot (P_{0VVV} + P_{V0VV}) + 4\mu_v \cdot P_{VVVV} = 0
 \end{aligned}$$

(2.10)

Las finalizaciones posibles dependen del número de time slots ocupados, para ello hemos definido la variable  $i_{rv}$  como el número de time slots consecutivos ocupados empezando por la derecha e  $i_{rd}$  representará el número de time slots consecutivos ocupados empezando por la izquierda. Al contrario que las finalizaciones, las llegadas dependen del número de time slots libres. En caso de que se produzca una llegada de tráfico de voz y se encuentre algún time slot reservado libre, ésta ocupará el time slot reservado con ID mayor libre, si todos los time slots reservados están ocupados pero hay algún time slot compartido libre, la unidad de voz ocupará el time slot compartido con

<sup>1</sup> Todas las expresiones de las ecuaciones de transición aparecidas a lo largo de este TFC están basadas en el artículo [1].

identificador mayor que se encuentre libre. Si se produce una llegada de tráfico de datos y se encuentra algún time slot compartido libre, ésta ocupará el time slot compartido con ID menor que se encuentre libre. En caso de que se produzca una llegada de tráfico de datos o tráfico de voz al sistema y se encuentre los  $n$  time slots ocupados ésta se perderán.

Los términos de las ecuaciones con signo negativo nos indican los estados de los que puede provenir el estado objeto de estudio. En el caso que haya algún time slot reservado libre, este estado puede provenir de un estado anterior donde ese time slot reservado estuviera ocupado por tráfico de voz y que éste hubiera finalizado. Si en el estado objeto de estudio hay algún time slot compartido libre y algún time slot reservado libre, este estado puede provenir de un estado anterior donde ese time slot compartido estuviera ocupado por tráfico de datos y que éste hubiera finalizado. En cambio, si hay algún time slot compartido libre y todos los time slots reservados ocupados, este estado puede provenir de un estado anterior donde el time slot compartido libre estuviera ocupado por tráfico de datos y que éste hubiera finalizado o que hubiera estado ocupado por tráfico de voz. En caso de que el time slot compartido hubiese estado ocupado por voz y que se produjera una finalización en alguno de los time slots reservados se podría producir un traspaso de la unidad de voz que ocupase el time slot compartido con ID menor al time slot reservado que acaba de finalizar o simplemente la unidad de voz en el time slot compartido finalizaría, convirtiéndose en el estado objeto de estudio.

En algunos casos también será posible que el estado actual provenga de un estado donde el time slot ocupado actualmente hubiese estado libre y se produjera una llegada que ocupase ese time slot, esto ocurrirá siempre y cuando el time slot con  $ID=1$  esté ocupado para el caso de las llegadas de tráfico de datos o cuando el time slot con  $ID=n$  esté ocupado para el caso de tráfico de voz, para ello definiremos  $k_{rv}$  como el número de time slots ocupados consecutivamente por tráfico de voz o datos empezando a contar desde el time slot número  $n$  y  $k_{rd}$  como el número de time slots ocupados consecutivamente por tráfico voz o datos empezando a contar desde el time slot número 1.

La cadena de Markov que representa todos los estados posibles para un sistema con 3 time slots; 1 compartido y 2 de reserva, la podemos observar en la figura 2.20. A partir de esta cadena obtenemos las ecuaciones de transición para todos los estados posibles.



donde:

$$k_1 = \sum_{i=1}^{n-m} r_i \cdot 3^{n-m-i} \quad (2.11)$$

Con la ecuación 2.12 podemos calcular las ecuaciones que van desde el estado  $2^n - 2^{n-m} + 1$  hasta el estado  $3^n + 2^n - 2^{n-m}$  (ver [1]).

$$\begin{aligned} & \left[ b(i_{rd} + i_{rv} < n) \cdot \lambda_v + b(i_{rd} < n-m) \cdot \lambda_d + i_{rv} \cdot \mu_v + i_{rd} \cdot \mu_d \right] \cdot P(r) = \\ & = b(i_{rd} + i_{rv} < n) \cdot \left[ \mu_d \cdot \sum_{\substack{j=k_{rd}+1 \\ j/r_j=0}}^{n-k_{rv}} P(r + 3^{n-m-j}) + \sum_{\substack{j=k_{rv}+1 \\ j/r_j=0}}^{n-k_{rv}} P(r + 2 \cdot 3^{n-m-j}) \right] \begin{cases} \mu_v & \text{si } j \geq L_r \\ (m+1) \cdot \mu_v & \text{si } j < L_r \end{cases} \\ & + b(k_{rd} > 0) \cdot \lambda_d \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j/r_j=1}}^{k_{rd}} P(r - 3^{n-m-j}) + b(k_{rv} > m \ \& \ L_r \leq n-m) \cdot \lambda_v \cdot \sum_{\substack{j=n-k_{rv}+1 \\ j/r_j=2}}^{n-m} P(r - 2 \cdot 3^{n-m-j}) + \\ & + b(L_r = n-m+1) \cdot \lambda_v \cdot \sum_{i=1}^{n-m} P(k_2 - 2^{2n-m-i}) \end{aligned}$$

donde:

$$k_2 = 1 + \sum_{i=1}^{n-m} r_i \cdot 2^{n-m} + \sum_{i=n-m+1}^n 2^{2n-m-i} \quad (2.12)$$

Donde  $L_r$  nos indica el identificador menor del time slot compartido ocupado por voz, con objeto de indicar cual será la unidad que hay que traspasar en caso de que se libere un time slot reservado y haya tráfico de voz en los time slots compartidos.

En el caso que haya uno o más times slots compartidos ocupados por voz y finalice el time slot compartido con ID menor, es decir, la voz que ocupa el time slot  $L_r$  finalice, o finalice la voz de algún time slot reservado, se producirá un traspaso con probabilidad  $(m+1) \cdot \mu_v$  ese estado cambiará al estado con  $L_r$  vacío. En caso de que el time slot ocupado por voz que finalice sea diferente a  $L_r$  no se produciría traspaso, y la probabilidad de cambiar de estado sería  $\mu_v$ .

En caso de que todos los time slots reservados estén ocupados y haya voz en los time slots compartidos, es decir, que se cumpla la condición  $b(L_r = n-m+1)$ , estos estados pueden provenir de estados anteriores donde hubiera algún time slot reservado libre y se produjera una llegada de voz ocupando dicho time slot. En los casos en que todos los time slots reservados estén ocupados y algún time slot compartido esté ocupado por voz, es decir, que se cumpla la condición  $b(k_{rv} > m \ \& \ L_r \leq n-m)$ , estos estados pueden provenir de estados anteriores donde el time slot compartido que está ocupado por voz hubiese estado libre y se produjera una llegada de tráfico de voz que lo ocupase, siempre que no haya time slots ocupados de ID mayor.

$K_1$  expresa un cambio de base de los estados donde hay un time slot reservado libre a estados donde todos los time slots reservados están ocupados.  $K_2$  expresa un cambio de base de un estado donde todos los time slots reservados están ocupados a estados donde hay un time slot reservado libre.

Una vez tenemos todas las ecuaciones, el siguiente paso es construir la matriz de transición de estado (*Matriz A*). En la figura 2.21 podemos ver un ejemplo de matriz A para un sistema con 2 time slots reservados y 1 time slot compartido, donde cada fila indica los valores correspondientes a cada ecuación de estado, a excepción de la última fila en la que todos sus valores son unos, con la finalidad de provocar que la suma de las probabilidades sea 1.

$$\text{Matriz A} = \begin{pmatrix} \lambda_v + \lambda_d & -\mu_d & -\mu_v & 0 & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda_d & \lambda_v + \lambda_d & 0 & -\mu_v & 0 & -\mu_v & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda_v & 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_v & -\mu_d & 0 & 0 & -\mu_v & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_v & -\lambda_d & \lambda_v + \mu_v + \mu_d & 0 & 0 & 0 & -\mu_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_v & -\mu_d & -\mu_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_d & \lambda_v + \mu_v + \mu_d & 0 & -\mu_v & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_v & 0 & -\lambda_v & 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_v + \mu_d & -\mu_d & -3\mu_v \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_v & 0 & -\lambda_v & -\lambda_d & 2\mu_v + \mu_d & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

**Fig.2.21.** Matriz A para un sistema con  
1 time slot de reserva y 1 time slots compartido

Una vez calculada la matriz A, donde cada fila contendrá los valores dependientes de cada ecuación de transición a excepción de última fila donde todos los valores serán unos, definimos la matriz valores independientes BM. . Por último creamos una matriz P, y aplicaremos la expresión 2.4 para resolver el sistema de ecuaciones.

## 2.4 Modelo 4: Asignación de recursos para tráfico de voz y de datos con buffer y reserva de voz.

### 2.4.1 Modelo Teórico.

Este modelo estará compuesto por  $n$  time slots, de los cuales  $m$  time slots estarán reservados para tráfico de voz y  $n-m$  time slots estarán compartidos para tráfico de datos y tráfico de voz además de un buffer de  $q$  posiciones. En la figura 2.22 observamos un ejemplo de un sistema con 3 time slots; 1 de reserva y 2 compartidos y un buffer de  $q$  posiciones.

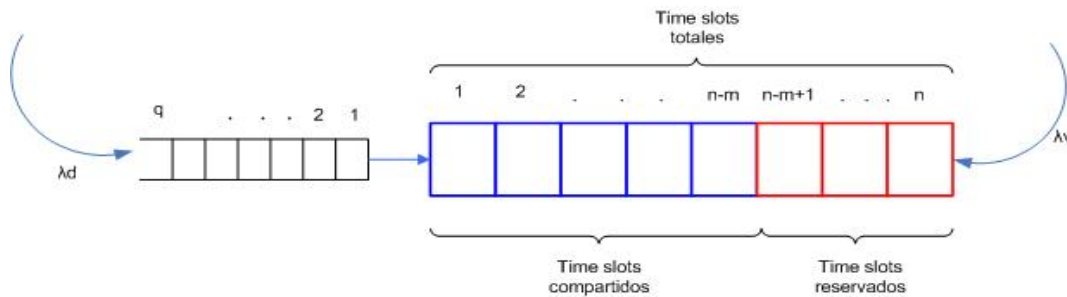


fig. 2.22. Sistema con  $n-m$  time slots compartidos,  $m$  de reserva y  $q$  posiciones de buffer

El tráfico de datos que llegue al sistema ocupará el time slot compartido con ID menor que se encuentre libre pero nunca podrá ocupar un time slot reservado, en caso de que todos los  $n-m$  time slots compartidos estén ocupados el tráfico de datos pasará a ocupar la primera posición libre del buffer. Éste buffer tiene  $q$  posiciones, tal y como podemos observar en la figura 2.18, y seguirá una disciplina *First In First Out* (FIFO).

El tráfico de voz que llegue al sistema y se encuentre alguno de los  $n$  time slots reservados libres, ocupará el time slot reservado con ID mayor que se encuentre libre. Por tanto, el tráfico de voz sólo podrá ocupar time slots compartidos si todos los time slots reservados están ocupados. Debemos resaltar que en el momento en el que quede libre un time slot reservado, se producirá un traspaso en la misma celda (*intra-cell handover*) y la unidad de voz que estaba en el time slot compartido con ID menor pasará a ocupar el time slot reservado que acaba de quedar libre. En caso de que el tráfico de voz se encuentre los  $n$  time slot ocupados se perderá.

Para este modelo el total de estados posibles será:

$$\text{Número de estados} = 3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m} + q \cdot (2^m + 2^{n-m} - 1)$$

(2.13)

El criterio que hemos seguido para numerar los estados de este sistema es el siguiente: primeros  $2^n - 2^{n-m}$  estados nunca tienen los  $m$  time slots reservados ocupados, como mínimo siempre habrá un time slot reservado libre. Por tanto, para estos estados los time slots reservados sólo podrán estar libres o tener datos, de manera que podemos utilizar base 2 para numerarlos.

En la figura 2.23 observamos un ejemplo de los primeros  $2^n - 2^{n-m}$  con un sistema de 4 time slots: 2 time slots de reserva, 2 time slots compartidos y un buffer con una única posición. El primer valor separado por una coma nos indica cuantas posiciones hay ocupadas en el buffer.

1 -> 0,0000	5 -> 0,0002	9 -> 0,0020
2 -> 0,0100	6 -> 0,0102	10 -> 0,0120
3 -> 0,1000	7 -> 0,1002	11 -> 0,1020
4 -> 0,1100	8 -> 0,1102	12 -> 0,1120

fig. 2.23. Estados desde el 1 hasta el  $2^n - 2^{n-m}$

Los estados que van desde el  $2^n - 2^{n-m} + 1$  hasta el  $3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m}$  siempre tendrán los  $m$  time slots reservados ocupados, por lo que cada time slot compartido podrá tener 3 posibles estados: libre, tener tráfico de datos o tráfico de voz. Para numerar estos estados lo que haremos será numerar los time slots compartidos en base 3 mientras que los time slots reservados serán fijos, tal y como observamos en la figura 2.24 siguiendo con el ejemplo anterior.

13 -> 0,0022	16 -> 0,1022	19 -> 0,2022
14 -> 0,0122	17 -> 0,1122	20 -> 0,2122
15 -> 0,0222	18 -> 0,1222	21 -> 0,2222

fig. 2.24. Estados desde el  $2^n - 2^{n-m} + 1$  hasta el  $3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m}$

Los estados que van desde el  $3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m} + 1$  hasta el  $3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m} + q \cdot (2^m + 2^{n-m} - 1)$  son los que correspondientes a los estados en que el buffer tiene una o más posiciones ocupadas. En este caso los enumeraremos en dos bloques, en el primero tendremos una parte de estados en los que todos los time slots compartidos estarán ocupados por datos y habrá uno o más time slots reservados libres. En la segunda parte tendremos todos los time slots reservados ocupados por voz, de manera que los time slots compartidos estarán ocupados por voz o datos. En la figura 2.25 vemos estos representados para el ejemplo anterior de 2 time slots reservados, 2 time slots compartidos y con una posición de buffer.

22 -> 1,1100	26 -> 1,1222
23 -> 1,1102	27 -> 1,2122
24 -> 1,1120	28 -> 1,2222
25 -> 1,1122	

fig. 2.25. Estados desde el  $3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m} + 1$   
hasta  $3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m} + q \cdot (2^m + 2^{n-m} - 1)$

Una vez que ya hemos numerado los estados de nuestro sistema pasaremos a representar algunos estados utilizando diagramas de Markov para definir las ecuaciones de transición, utilizando como ejemplo un sistema con una sola posición de buffer, 2 time slots compartidos y 2 time slots de reserva.

En la figura 2.26 observamos representado el estado 21 (0,VVVV) donde todos los time slots están ocupados por tráfico de voz y el buffer está libre.

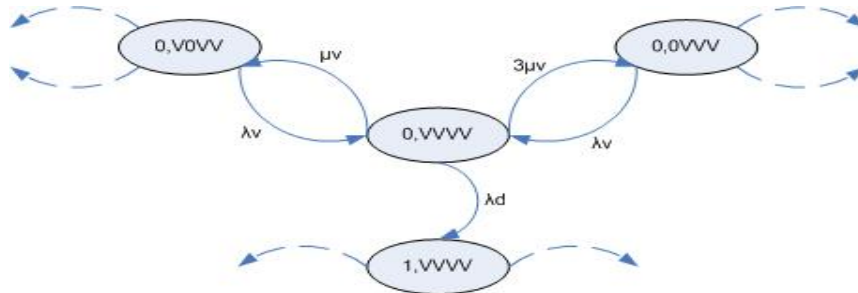


fig.2.26. Representación del estado 0,VVVV.

En la figura 2.27 observamos representado el estado 25 (0,DDVV) donde todos los time slots compartidos están ocupados por tráfico de datos, todos los time slots reservados están ocupado por tráfico de voz y el buffer está libre.

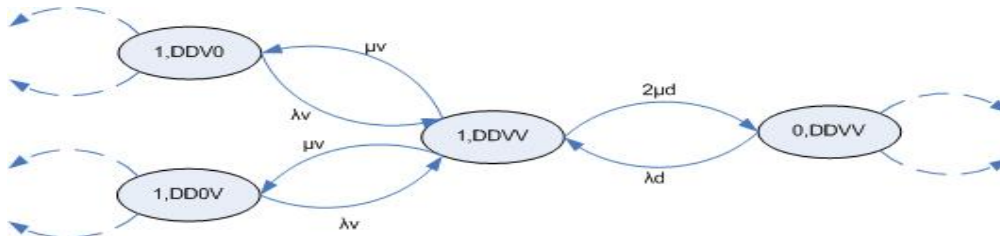


fig.2.27. Representación del estado 1,DDVV.

A partir de estas dos figuras (2.26 y 2.27), podemos definir las ecuaciones de transición para el estado 0,VVVV y el estado 1,DDVV respectivamente:

$$\begin{aligned}
 & - \lambda_v \cdot (P_{0,0VVV} + P_{0,V0VV}) + (4\mu_v + \lambda_d) \cdot P_{0,VVVV} = 0 \\
 & - \lambda_v \cdot (P_{1,DD0V} + P_{1,DDV0}) - \lambda_d \cdot P_{0,DDVV} + (2\mu_v + 2\mu_d) \cdot P_{1,DDVV} = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

Las finalizaciones posibles dependen del número de time slots ocupados, para ello definimos  $i_{rv}$  e  $i_{rd}$  como en el modelo anterior (ver 2.1.1). Las llegadas dependen del número de time slots vacíos. En caso de que se produzca una llegada de tráfico de voz y se encuentre algún time slot libre, ésta ocupará el time slot reservado con ID mayor que se encuentre libre, si todos los time slots reservados están ocupados pero hay algún time slot compartido libre, la unidad de voz ocupará el time slot compartido con identificador mayor que se encuentre libre. Si se produce una llegada de tráfico de datos y se encuentra algún time slot compartido libre, ésta ocupará el time slot compartido con ID menor que se encuentre libre. En caso de que se produzca una llegada de tráfico de datos y se encuentren los  $n-m$  time slots compartidos ocupados, la llamada pasará a ocupar la primera posición libre del buffer. Si todo el buffer está ocupado se perderá. Si la llegada al sistema es de tráfico de voz y se encuentran los  $n$  time slots ocupados ésta se perderá.

Los términos de las ecuaciones con signo negativo nos indican los estados de los que puede provenir el estado objeto de estudio. En el caso que haya algún time slot reservado libre, este estado puede provenir de un estado anterior



donde ese time slot reservado estuviera ocupado por tráfico de voz y que éste hubiera finalizado. Si en el estado objeto de estudio hay algún time slot compartido libre y algún time slot reservado libre, este estado puede provenir de un estado anterior donde ese time slot compartido estuviera ocupado por tráfico de datos y que éste hubiera finalizado. En cambio, si hay algún time slot compartido libre y todos los time slots reservados ocupados, este estado puede provenir de un estado anterior donde el time slot compartido libre estuviera ocupado por tráfico de datos y que éste hubiera finalizado o que hubiera estado ocupado por tráfico de voz. En caso de que el time slot compartido hubiese estado ocupado por voz y que se produjera una finalización en alguno de los time slots reservados, se produciría un traspaso de la unidad de voz que ocupase el time slot compartido con ID menor al time slot reservado que acaba de finalizar o simplemente la unidad de voz en el time slot compartido finalizaría, convirtiéndose en el estado objeto de estudio.

Si hay alguna posición ocupada en el buffer y se libera un time slot compartido, el primer segmento de datos que está en el buffer pasaría a ocupar el time slot compartido liberado.

En algunos casos también será posible que el estado actual provenga de un estado donde el time slot ocupado actualmente hubiese estado libre y se produjera una llegada que ocupase ese time slot, esto ocurrirá siempre y cuando el time slot con ID=1 esté ocupado para el caso de las llegadas de tráfico de datos o cuando el time slot con ID=n esté ocupado para el caso de tráfico de voz, para ello definiremos  $k_{rv}$  como el número de time slots ocupados consecutivamente por tráfico de voz o datos empezando a contar desde el time slot número n y  $k_{rd}$  como el número de time slots ocupados consecutivamente por tráfico voz o datos empezando a contar desde el time slot número 1.

La cadena de Markov que representa todos los estados posibles para un sistema con 3 time slots; 1 compartido y 2 de reserva y un buffer con una única posición, la podemos observar en la figura 2.28. A partir de esta cadena obtenemos las ecuaciones de transición para todos los estados posibles.

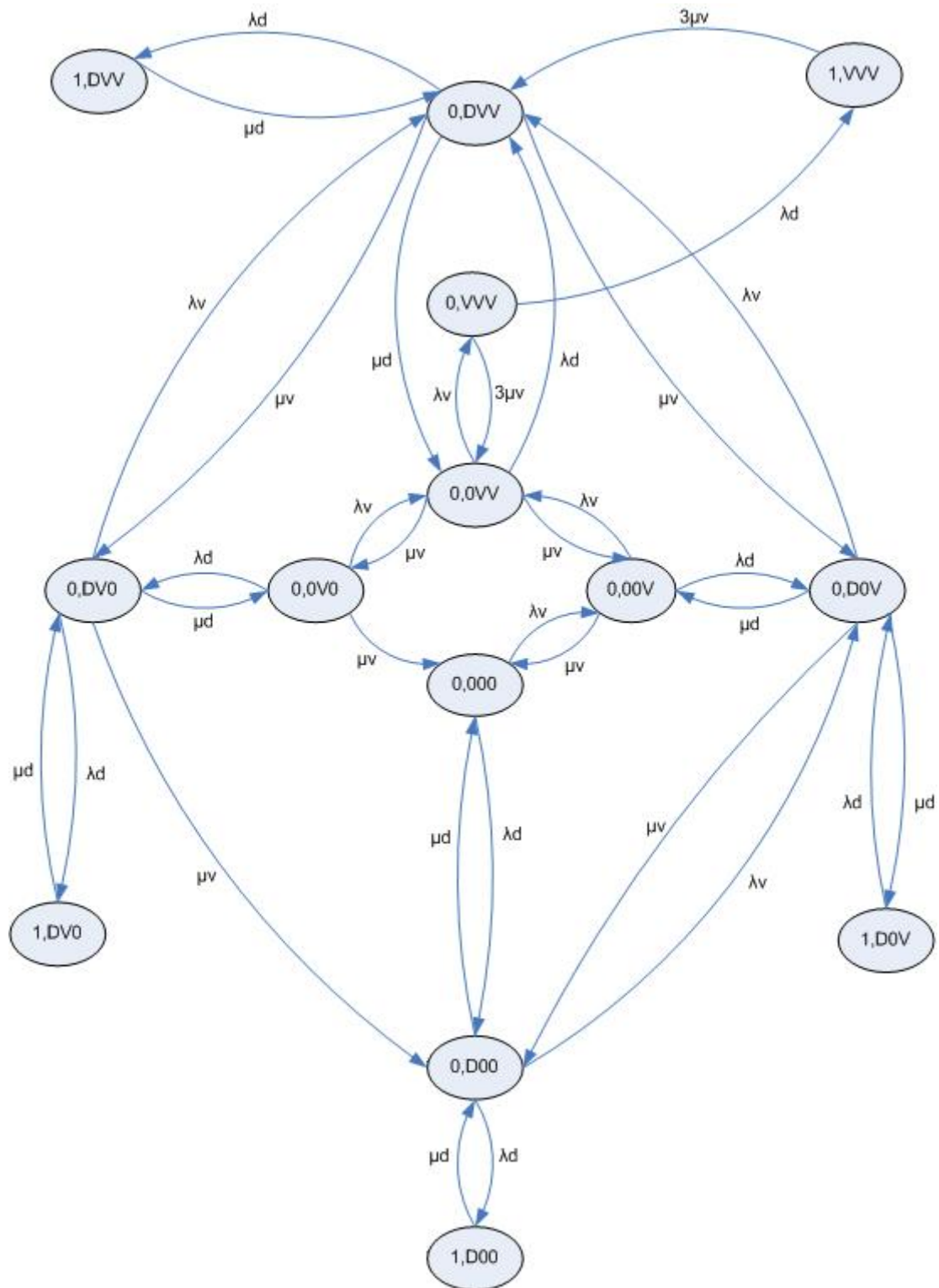


fig. 2.28. Cadena de Markov con 1 time slot compartido,  
2 time slots de reserva y 1 posición de buffer.

Todas las ecuaciones de transición de estados para este modelo se pueden resumir en tres bloques ecuaciones (ver [1]). Con la ecuación 2.15 podemos calcular las ecuaciones de transición que van desde el estado 1 hasta el estado  $2^n - 2^{n-m}$ .

$$\begin{aligned}
& \left[ \lambda_v + b(i_{rd} < n-m) \cdot \lambda_d + i_{rd} \cdot \mu_d + i_{rv} \cdot \mu_v \right] \cdot P(r) = \\
& = b(i_{rv} < m-1) \cdot \mu_v \cdot \sum_{\substack{j=n-m+1 \\ j/r_j=0}}^{n-k_{rv}} P(r + 2^{2n-m-j}) + b(i_{rv} = m-1) \cdot \mu_v \cdot P(1 + 2^n - 2^{n-m} + k_1) + \\
& + b(i_{rd} < n-m) \cdot \mu_d \cdot \sum_{\substack{j=k_{rd}+1 \\ j/r_j=0}}^{n-m} P(r + 2^{n-m-j}) + b(i_{rd} = n-m \text{ \& } B \geq 1) \cdot \mu_d \cdot (n-m) \cdot P(1 + 3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m} + k_3) \\
& + b(k_{rv} > 0) \cdot \lambda_v \cdot \sum_{j=n-k_{rv}+1}^n P(r - 2^{2n-m-j}) + b(k_{rd} > 0) \cdot \lambda_d \cdot \sum_{j=1}^{k_{rd}} P(r - 2^{n-m-j})
\end{aligned}$$

donde:

$$k_1 = \sum_{i=1}^{n-m} r_i \cdot 3^{n-m-i} \quad k_3 = \sum_{\substack{i=n-m+1 \\ i/r_i \neq 0}}^n 2^{n-i}$$

(2.15)

Con la ecuación 2.16 podemos calcular las ecuaciones que van desde el estado  $2^n - 2^{n-m} + 1$  hasta el estado  $3^n + 2^n - 2^{n-m}$  (ver [1]).

$$\begin{aligned}
& \left[ b(i_{rd} + i_{rv} < n) \cdot \lambda_v + b(i_{rd} < n-m) \cdot \lambda_d + i_{rv} \cdot \mu_v + i_{rd} \cdot \mu_d \right] \cdot P(r) = \\
& = b(i_{rd} + i_{rv} < n) \cdot \left[ \mu_d \cdot \sum_{\substack{j=k_{rd}+1 \\ j/r_j=0}}^{n-k_{rv}} P(r + 3^{n-m-j}) + \sum_{\substack{j=k_{rd}+1 \\ j/r_j=0}}^{n-k_{rv}} P(r + 2 \cdot 3^{n-m-j}) \right] \begin{cases} \mu_v & \text{si } j \geq L_r \\ (m+1) \cdot \mu_v & \text{si } j < L_r \end{cases} \\
& + b(k_{rd} > 0) \cdot \lambda_d \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j/r_j=1}}^{k_{rd}} P(r - 3^{n-m-j}) + b(k_{rv} > m \text{ \& } L_r \leq n-m) \cdot \lambda_v \cdot \sum_{\substack{j=n-k_{rv}+1 \\ j/r_j=2}}^{n-m} P(r - 2 \cdot 3^{n-m-j}) + \\
& + b(L_r = n-m+1) \cdot \lambda_v \cdot \sum_{i=n-m+1}^n P(k_2 - 2^{2n-m-i}) + \\
& + b(i_{rd} + i_{rv} = n \text{ \& } B \geq 1) \cdot \left[ \mu_d \cdot i_{rd} \cdot P(k_4) + \mu_v \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i/r_i=1}}^{n-m} P(k_4 + 2^{n-m-i}) \right]
\end{aligned}$$

donde:

$$k_2 = 1 + \sum_{i=1}^{n-m} r_i \cdot 2^{n-m} + \sum_{i=n-m+1}^n 2^{2n-m-i}$$

$$k_4 = \sum_{i=1}^{n-m} (r_i - 1) \cdot 2^{n-m-i} + 3^{n-m} + 2^n - 2^{n-m} + 2^m \quad (2.16)$$

Con la ecuación 2.17 podemos calcular las ecuaciones que van desde el estado  $3^n + 2^n - 2^{n-m} + 1$  hasta el estado  $3^n + 2^n - 2^{n-m} + q \cdot (2^m + 2^{n-m} - 1)$  (ver [1]).

$$\begin{aligned} & \left( b(B < q) \cdot \lambda_d + b(i_{rv} < m) \cdot \lambda_v + i_{rv} \cdot \mu_v + i_{rd} \cdot \mu_d \right) \cdot P(r) = \\ & = b(B > 1) \cdot \lambda_d \cdot P\left(r - (2^m + 2^{n-m} - 1)\right) + \\ & + b(B = 1) \cdot \lambda_d \cdot \begin{cases} P\left(2^{n-m} + \sum_{\substack{i=n-m+1 \\ r_i \neq 0}}^n 2^{2n-m-i}\right) & \text{si } i_{rv} < m \\ P\left(1 + 2^n - 2^{n-m} + \sum_{i=1}^{n-m} r_i \cdot 3^{n-m-i}\right) & \text{si } i_{rv} \geq m \end{cases} + \\ & + b(k_{rv} > 0 \ \& \ L_r > n-m) \cdot \lambda_v \cdot \sum_{\substack{j=n-k_{rv}+1 \\ j/r_j=2}}^n P(r + 2^{n-j}) + \\ & + b(B < q) \cdot \left[ i_{rd} \cdot \mu_d \cdot P(r + 2^m + 2^{n-m} - 1) + b(i_{rv} \geq m) \cdot (m+1) \cdot \mu_v \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j/r_j=1}}^{n-m} P(r + 2^{n-m-j} + 2^m + 2^{n-m} - 1) \right] + \\ & + b(i_{rv} < m) \cdot \mu_v \cdot \sum_{\substack{j=n-m+1 \\ j/r_j=0}}^n P(r + 2^{n-1}) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Donde  $B$  corresponde al número de posiciones ocupadas del buffer por tráfico de datos y  $q$  corresponde al tamaño del buffer.

$L_r$  nos indica el identificador menor del time slot compartido ocupado por voz, con objeto de indicar cual será la unidad que hay que traspasar en caso de que se libere un time slot reservado y haya tráfico de voz en los time slots compartidos.

Si todos los time slots compartidos están ocupados por datos y en el buffer hay posiciones ocupadas, es decir, se cumple  $b(i_{rd} \geq n-m \ \& \ B \geq 1)$  puede ocurrir que se libere algún time slot compartido y éste pase a ser ocupado por un dato de la cola.

En el caso de que haya uno o más times slots compartidos ocupados por voz y finalice el time slot compartido con ID menor, es decir, la voz que ocupa el time slot  $L_r$  o finalice algún time slot reservado, se producirá un traspaso y la probabilidad de cambiar al estado con  $L_r$  vacío sería  $(m+1) \cdot \mu_v$ . En caso de que el time slot ocupado por voz que finalice sea diferente a  $L_r$  no se produciría traspaso, y la probabilidad de cambiar de estado sería  $\mu_v$ .

Si todos los time slots reservados están ocupados y no hay ninguna voz en los time slots compartidos, es decir, que se cumpla la condición  $b (L_r \geq n-m+1)$ , estos estados pueden provenir de estados anteriores donde hubiera algún time slot reservado libre y se produjera una llegada de voz ocupando dicho time slot. En los casos en que todos los time slots reservados estén ocupados y algún time slot compartido esté ocupado por voz, es decir, que se cumpla la condición  $b (k_{rv} > m \text{ \& } L_r \leq n-m)$ , estos estados pueden provenir de estados anteriores donde el time slot compartido que está ocupado por voz hubiese estado libre con todos los time slots de ID menor ocupados y se produjera una llegada de tráfico de voz que lo ocupase.

$K_1$  expresa un cambio de base de estados donde hay un time slot reservado libre a estados donde todos los time slots reservados están ocupados.  $K_2$  expresa un cambio de base de un estado donde todos los time slots reservados están ocupados y no hay voz en los time slots compartidos a estados donde hay un time slot reservado libre.  $K_3$  representa un cambio de base de estados donde todos los time slots compartidos están ocupados por datos y el buffer está libre a estados donde todos los time slots compartidos están ocupados por datos y en el buffer hay posiciones ocupadas por tráfico de datos.  $K_4$  representa un cambio de base de estados donde los time slots compartidos están ocupados por voz o datos y el buffer está libre a estados donde hay una posición ocupada por datos en el buffer y en los time slots compartidos hay voz o datos.

Una vez tenemos todas las ecuaciones, el siguiente paso es construir la matriz de transición de estado (*Matriz A*). En la figura 2.29 podemos ver un ejemplo de matriz A para un sistema con 2 time slots reservados y 1 time slot compartido y una posición de buffer, donde cada fila indica los valores correspondientes a cada ecuación de estado, a excepción de la última fila en la que todos sus valores son unos, con la finalidad de provocar que la suma de las probabilidades sea 1.

$$\text{Matriz A} = \begin{pmatrix} \lambda_v + \lambda_d & -\mu_d & -\mu_v & 0 & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda_d & \lambda_v + \lambda_d + \mu_d & 0 & -\mu_v & 0 & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda_v & 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_v & -\mu_d & 0 & 0 & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_v & -\lambda_d & \lambda_v + \mu_d + \mu_v & 0 & 0 & 0 & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_v + \lambda_d + \mu_v & -\mu_d & 0 & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_d & \lambda_v + \lambda_d + \mu_d + \mu_v & 0 & -\mu_v & 0 & 0 & 0 & -\mu_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_v & 0 & -\lambda_v & 0 & \lambda_v + \lambda_d + 2\mu_v & -\mu_d & -3\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_v & 0 & -\lambda_v & -\lambda_d & \lambda_d + 2\mu_v + \mu_d & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_d & -3\mu_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_v & 0 & \lambda_d + 3\mu_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_v + \mu_d & -\mu_v & -\mu_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\lambda_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_v & \lambda_v + \mu_d + \mu_v & 0 & -\mu_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_v + \mu_d + \mu_v & -\mu_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_d & 0 & 0 & 0 & -\lambda_v & -\lambda_d & \mu_d + 2\mu_v & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

**Fig. 2.29.** Matriz A para un sistema con 1 time slot compartido,  
1 time slot reservado y 1 posición de buffer.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS

Para analizar el grado de servicio que nos proporciona cada uno de los modelos explicados en los puntos anteriores hemos programado en Matlab guiones – *script*.

Los valores que abarca el grado de servicio son:

- *Probabilidad de Pérdida (PP)* que se define como la probabilidad de que una llamada llegue al sistema y se pierda. Para que un usuario tenga un GoS (grado de servicio) aceptable la PP la hemos fijado para que sea menor del 5%.
- *Probabilidad de Bloqueo (PB)* definida como la probabilidad de que una llamada llegue al sistema y se encuentre los  $n$  time slots ocupados. Para que un usuario tenga un GoS aceptable la PP la hemos fijado para que sea menor del 5%.
- *Probabilidad de Demora (PD)* se define como la probabilidad de que una llamada llegue al sistema y se tenga que esperar a ser cursada. Para que un usuario tenga un GoS aceptable la PP hemos fijado que este valor ha de ser menor del 15%.

Para cada modelo analizaremos 3 casos distintos:

- Caso 1: el tráfico ofrecido de voz ( $TO_v$ ) que llega al sistema es mayor el tráfico ofrecido de datos ( $TO_d$ ).
- Caso 2: el de tráfico ofrecido de datos ( $TO_d$ ) que llega al sistema es mayor el tráfico ofrecido de voz ( $TO_v$ ).
- Caso 3: el tráfico ofrecido de voz ( $TO_v$ ) es igual al tráfico ofrecido de datos ( $TO_d$ ).

Con los datos resultantes de estos 3 casos podremos extraer conclusiones sobre el impacto en el sistema de cada tipo de tráfico y el valor del  $TO_{max}$  que puede aceptar cada sistema para ofrecer una calidad de servicio aceptable.

### 3.1 Resultados modelo 1

En este modelo nuestro sistema se compone por  $n$  time slots y viene a representar una aproximación de un sistema de pérdidas puro (Fig.3.1) con tráfico ofrecido que obedece a una distribución de Poisson, de manera que la suma de los tráficos de voz y datos son también poissonianos (ver [5]).



**Fig. 3.1.** Tráfico ofrecido, cursado y perdido en un sistema sujeto a pérdidas

Aunque este sistema es secuencial y no de acceso aleatorio, hemos realizado la siguiente aproximación en la que el resultado del tráfico entrante en el sistema es también de Poisson, de tal manera que lo tratamos como un sistema de pérdidas puro por medio de Erlang:

$$TO_{\max} = TO_{\text{voz}} + TO_{\text{datos}} = \frac{\lambda_{\text{voz}}}{\mu_{\text{voz}}} + \frac{\lambda_{\text{datos}}}{\mu_{\text{datos}}} = A$$

$$PP = PB = Er_B(A, n)$$

(3.1)

Esto significa que podemos fijar un valor de PP para ofrecer un cierto GoS, 5% máximo de pérdidas. Miramos la tabla de Erlang (Tabla 3.1), para el número de time slots que tenemos y el valor de PP que queremos que valor de tráfico ofrecido (A) le corresponde.

A/n	7	8
3,7	0,048270	0,021837
3,8	0,052907	0,024515
3,9	0,057737	0,027376

**Tabla 3.1.** Fragmento de la tabla Erlang<sub>B</sub>

Por ejemplo, si tenemos un sistema de n=7 time slots y queremos que la probabilidad de pérdida sea menor del 5%, ¿cuál es el tráfico máximo que podemos ofrecer al sistema? Si miramos la tabla anterior vemos que el tráfico que se le puede ofrecer al sistema para obtener una PP<0,05 es de 3,7 Erlangs, si aumentamos el tráfico, la PP aumenta superando el 5%.

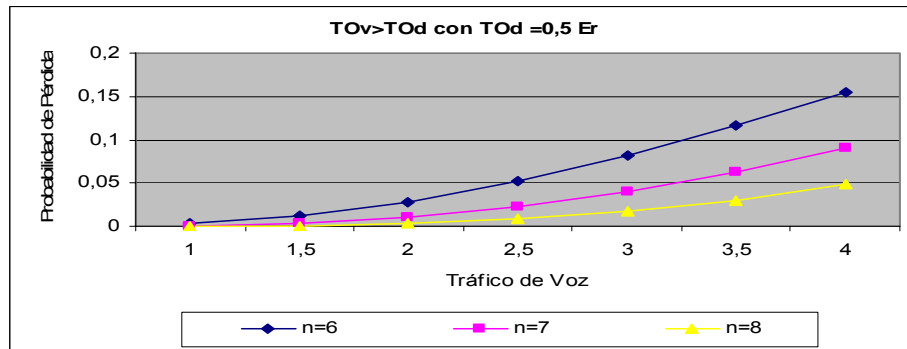
En la tabla 3.2 podemos ver los valores que nos da la tabla de Erlang<sub>B</sub> para los sistemas que vamos a analizar seguidamente.

Nº de time slots del sistema	Tráfico Ofrecido Máximo
6 Time slots	2,9 Erlangs
7 Time slots	3,7 Erlangs
8 Time slots	4 Erlangs

**Tabla 3.2.** TO<sub>max</sub> teóricos para diferentes sistemas.

### 3.1.1 Caso 1: TO<sub>v</sub> > TO<sub>d</sub>

En la gráfica 3.1 está representada la probabilidad de pérdida para sistemas con 6, 7 y 8 time slots cuando el tráfico de voz es mayor que el tráfico de datos.



**Gráfica 3.1.** Probabilidad de Pérdida para  $TO_v > TO_d$ .

Como podemos observar en la gráfica 3.1, el incremento de la probabilidad de pérdida es casi lineal para los tres casos estudiados. La pendiente de la recta disminuye cuando aumentamos el número de time slots del sistema, lo cual es un comportamiento lógico ya que cuantos más recursos tenga nuestro sistema más tráfico podrá cursar y la probabilidad de pérdida será menor.

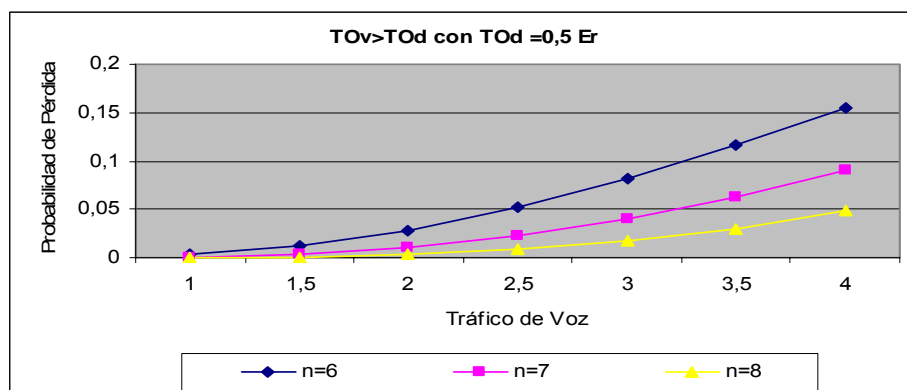
Los valores de  $TO_{max}$  que hemos obtenido en este caso (Tabla 3.3) son algo superiores a los mostrados en la tabla 3.2, esto es debido a que los valores que obtenemos de aplicar la expresión de Erlang<sub>B</sub>, son para sistemas de ocupación aleatoria y en nuestro modelo la ocupación es secuencial.

Nº de time slots del sistema	Tráfico Ofrecido Máximo
6 Time slots	3 Erlangs
7 Time slots	3,8 Erlangs
8 Time slots	4,5 Erlangs

**Tabla 3.3.** Modelo 1: Valores de  $TO_{max}$  obtenidos.

### 3.1.2 Caso 1: $TO_v > TO_d$

En la gráfica 3.1 está representada la probabilidad de pérdida para sistemas con 6, 7 y 8 time slots cuando el tráfico de datos es mayor que el tráfico de voz.



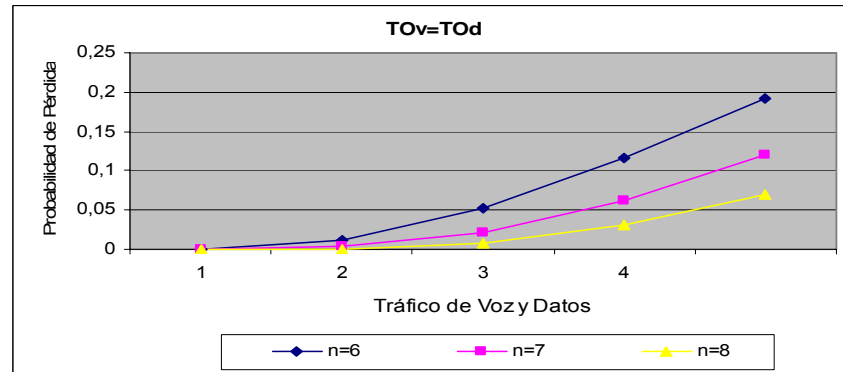
**Gráfica 3.2.** Probabilidad de Pérdida para  $TO_d > TO_v$ .

Como podemos observar, la gráfica 3.2 es muy similar a la gráfica 3.1. El incremento de la probabilidad de pérdida prácticamente lineal y disminuye cuando aumentamos el número de time slots. Los valores obtenidos de  $TO_{max}$  en este caso son los mismos que los mostrados en la tabla 3.3.



### 3.1.3 Caso 1: $TO_v = TO_d$

En la gráfica 3.3 está representada la probabilidad de pérdida cuando el tráfico de voz es igual al tráfico de datos.



**Gráfica 3.3.** Probabilidad de Pérdida para  $TO_v=TO_d$ .

En esta última gráfica observamos una evolución parecida a las gráficas anteriores (gráficas 3.1 y 3.2) y los valores de  $TO_{max}$  son los mismos que los obtenidos en caso 1 y 2.

Como podemos observar en las gráficas anteriores, el tipo de tráfico que llega al sistema no influye en la probabilidad de pérdida. En este modelo la probabilidad de pérdida solo se ve afectada por el número de recursos de que disponga el sistema y del volumen total de tráfico ofrecido, por lo tanto, cuantos más time slots tenga nuestro sistema más tráfico podremos cursar ya sea tráfico de datos o de voz.

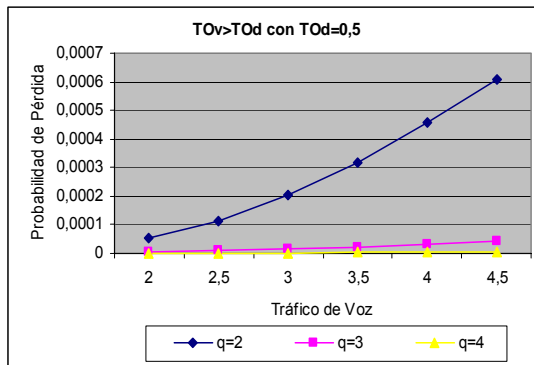
## 3.2 Resultados modelo 2

En este modelo nuestro sistema se compone por  $n$  time slots y  $q$  posiciones de *buffer*, el tráfico de datos que haya encontrado todos los recursos ocupados esperará en dicha cola o *buffer* a ser servido. Por lo tanto definiremos la *probabilidad de bloqueo (PB)* como la probabilidad de que llegue tráfico al sistema y encuentre todos los time slots ocupados. La probabilidad de que llegue tráfico al sistema y tenga que esperar en el buffer a ser servido será la *probabilidad de demora (PD)* y, por último, definiremos la *probabilidad de pérdida (PP)* como la probabilidad de que llegue tráfico al sistema y se pierda.

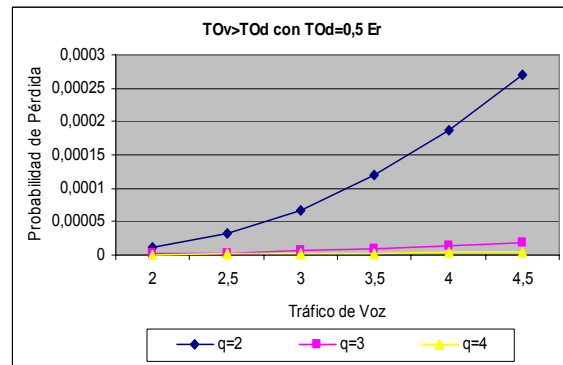
### 3.2.1 Caso 1: $TO_v > TO_d$

En las gráficas que mostraremos a continuación se representan las PP, PB y PD cuando el tráfico de voz que llega al sistema es mayor que el tráfico de datos. En la gráfica 3.4 están representadas las probabilidades de pérdida para un sistema con 7 time slots y un buffer con  $q = 2, 3$  y 4 posiciones.

respectivamente. En la gráfica 3.5 se representa la PP para un sistema con 8 time slots y las mismas posiciones de buffer.



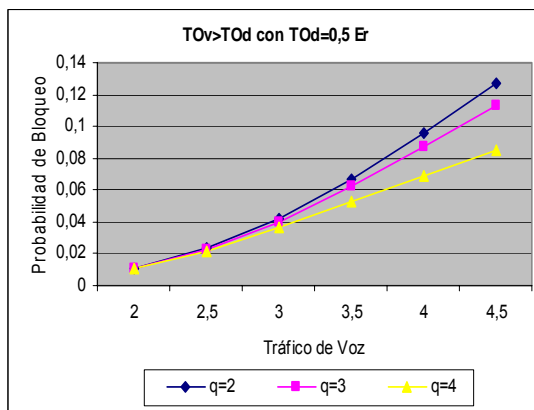
**Gráfica 3.4.** PP para n=7



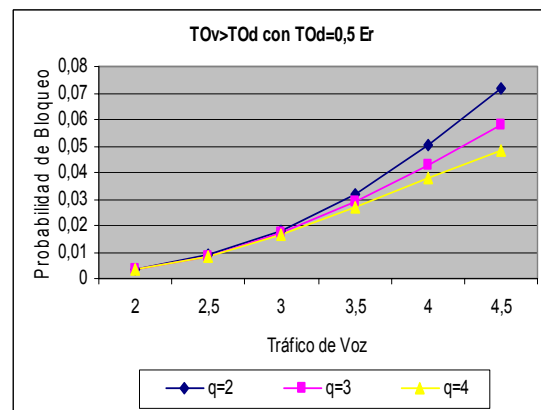
**Gráfica 3.5.** PP para n=8

Como podemos observar en las gráficas 3.4 y 3.5, la PP siempre es muy inferior al 5%. Las probabilidades de pérdida más elevadas las obtenemos cuando el buffer está compuesto por 2 posiciones, obteniendo valores de pérdidas entre 0% y 0,06%. Si introducimos una posición más en el buffer la probabilidad de pérdida descende notablemente hasta alcanzar un valor de PP cercana al 0%. En caso de que el buffer disponga de 4 posiciones las probabilidades de pérdida son prácticamente 0.

Pasemos ahora a analizar las gráficas 3.6 y 3.7 donde se representan las probabilidades de bloqueo.



**Gráfica 3.6.** PB para n=7



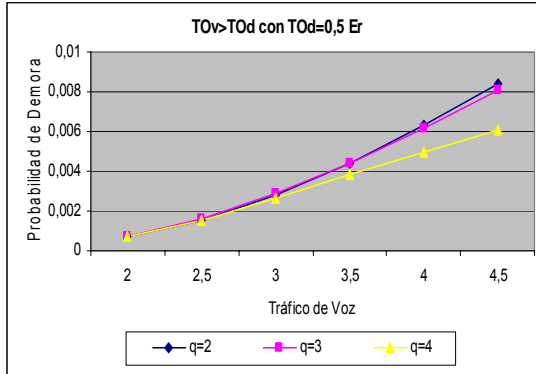
**Gráfica 3.7.** PB para n=8

En este caso observamos que la probabilidad de bloqueo va desde el 1% al 12% en el caso de un sistema con 7 time slots y de 0% al 7% para sistemas con 8 time slots. Los valores más elevados se obtienen cuando el buffer es de 2 posiciones. Cuando incrementamos en una posición el valor el buffer la PB descende sensiblemente. En cambio, cuando aumentamos a 4 posiciones el buffer notamos descensos más importantes, hasta 2% menos que teniendo un buffer con dos posiciones en sistemas de 8 time slots o un 5% menor en sistemas de 7 time slots.

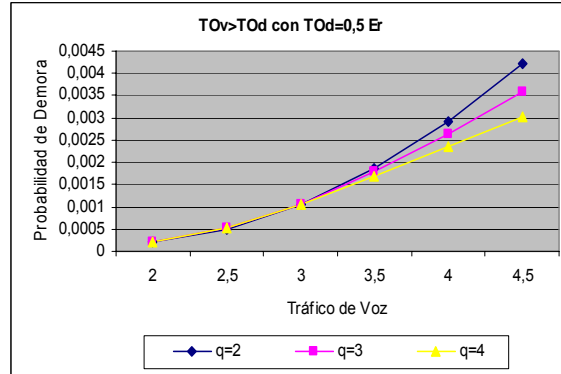
Cabe destacar que tener una PB del 12%, en este modelo con buffer, significa que se perdería el 12% del tráfico de voz que llega al sistema, teniendo en cuenta en concreto que el tráfico de datos que pasa por el buffer también se

puede encontrar el sistema bloqueado y bien pasa al buffer o bien se perderá si éste está totalmente ocupado.

En las gráficas 3.8 y 3.9 se representa la probabilidad de demora cuando el tráfico de voz es mayor que el tráfico de datos para sistemas con 7 y 8 time slots respectivamente.



**Gráfica 3.8.** PD para  $n=7$



**Gráfica 3.9.** PD para  $n=8$

En las gráficas anteriores observamos que los valores de probabilidad de demora van tomando una forma lineal cuando aumentamos el valor del buffer y oscilan entre el 0% y el 0,8% en el caso de un sistema con 7 time slots y entre el 0% y el 0,45% en el caso de 8 time slots. Los valores más elevados los obtenemos cuando el tamaño del buffer es de 2 posiciones, aunque éstos son muy similares a la PD cuando el buffer tiene 3 posiciones en el caso de  $n=7$  time slots. Cuando  $n=8$  time slots y tenemos 4 posiciones de buffer la PD disminuye en un 0,15% respecto a un buffer de 2 posiciones.

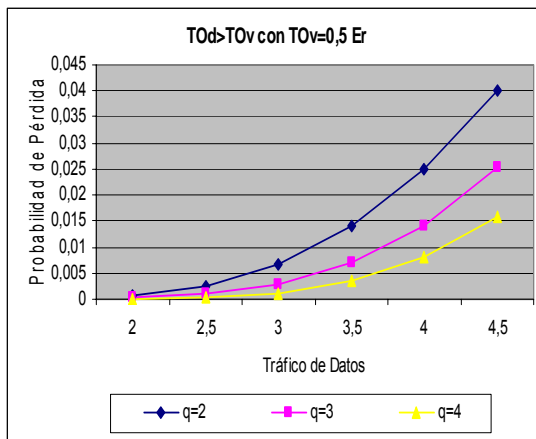
En este caso el  $TO_{max}$  está limitado por la PB ya que las PP están muy por debajo del 5% y la PD siempre es inferior al 15%. Los valores de  $TO_{max}$  para una  $PB \leq 5\%$  podemos verlos en la tabla 3.4.

Buffer/Time Slots	7	8
2	3,6 Erlangs	4,5 Erlangs
3	3,8 Erlangs	4,7 Erlangs
4	4 Erlangs	5 Erlangs

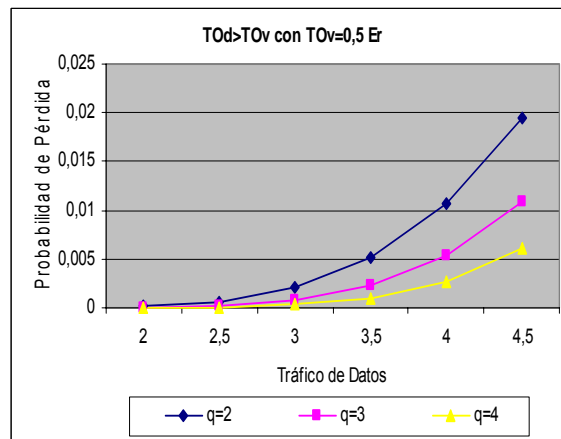
**Tabla 3.4** Modelo 2: Valores de  $TO_{max}$  caso 1.

### 3.2.2 Caso 1: $TO_v < TO_d$

Una vez analizadas las probabilidades cuando el tráfico de voz es mayor que el de datos pasaremos a analizar el caso en el que el tráfico de datos es mayor que el tráfico de voz. En la gráfica 3.10 observamos las probabilidades de pérdida para un sistema con 7 time slots y un buffer con  $q = 2, 3$  y 4 posiciones respectivamente. En la gráfica 3.11 se representa la PP para un sistema con 8 time slots y las mismas posiciones de buffer.



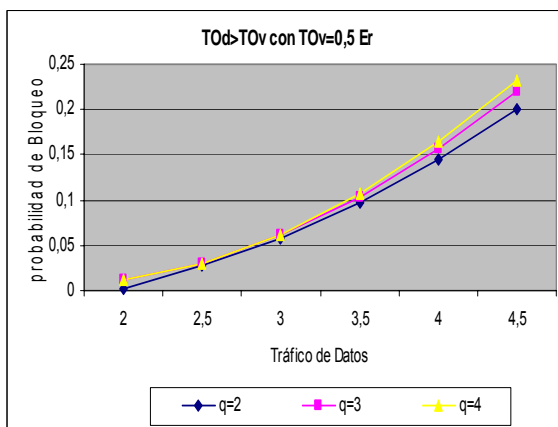
Gráfica 3.10. PP para n=7



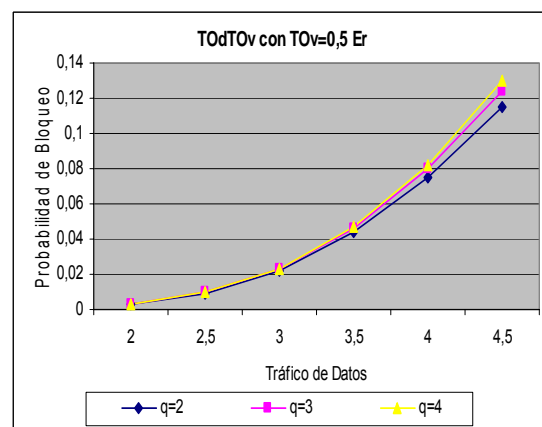
Gráfica 3.11. PP para n=8

En este caso el incremento de la probabilidad de pérdida tiene una forma de curva ascendente, donde el crecimiento es menor cuando aumentamos el valor del buffer. Los valores de pérdida más elevados los obtenemos cuando el buffer es de 2 posiciones y están comprendidos entre el 0% y el 4% para un sistema con 7 time slots y entre el 0% y el 2% para un sistema con 8 time slots. Cuando aumentamos el buffer a 4 posiciones la probabilidad de pérdida descende entre un 1,5% y un 2,5%. Aunque estos valores están por debajo del 5% de pérdidas son superiores que los obtenidos en el primer caso, esto es debido a que el tráfico de datos es el que pasará a ocupar posiciones en el buffer en el caso de que todos los time slots estén ocupados, por lo tanto el tamaño de buffer es importante en este caso donde el tráfico de datos es muy superior al tráfico de voz.

En las gráficas 3.12 y 3.13 se representa la probabilidad de bloqueo de sistemas con 7 y 8 time slots respectivamente.



Gráfica 3.12. PB con n=7

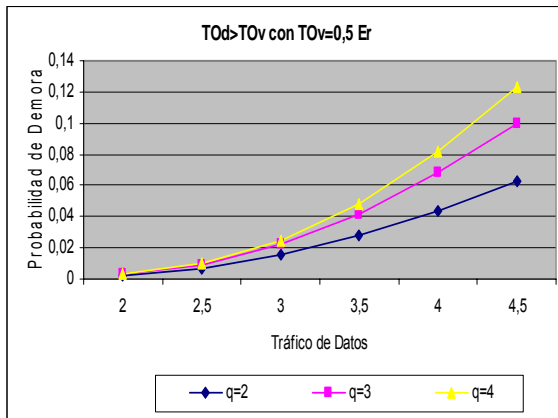


Gráfica 3.13. PB con n=8

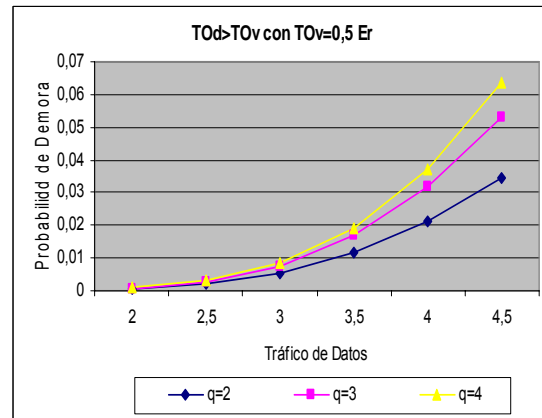
Como podemos observar en las gráficas 3.12 y 3.13 la probabilidad de bloqueo sigue un aumento con forma de curva ascendente donde los valores más elevados los obtenemos cuando el buffer tiene 4 posiciones y oscilan entre el 0% y el 25% para el sistema con 7 time slots y entre el 0% y el 13% para el sistema con 8 time slots. En este caso la PB es casi el doble que en el caso anterior, esto es debido a que los time slots no solo tendrán que cursar el

tráfico que ocupen los time slots sino también deberá cursar el tráfico que esté esperando en el buffer, esto hace que el sistema se bloquee antes que si el buffer estuviera vacío.

La probabilidad de demora para este caso la vemos representada en las gráficas 3.14 y 3.15.



Gráfica 3.14. PD con n=7



Gráfica 3.15 PD con n=8

En estas gráficas podemos observar como el aumento de la probabilidad de demora tiene un aumento con forma de curva ascendente, donde los valores más elevados los obtenemos cuando el buffer es de 4 posiciones y oscilan entre el 0% y el 12% para el sistema con 7 time slots y entre el 0% y el 6% para el sistema con 8 time slots. Cuando decrementamos el tamaño del buffer en una posición la PD disminuye entre un 2% y un 4% aproximadamente lo cual es un comportamiento lógico, ya que cuantas menos posiciones tengamos en el buffer menor será la probabilidad de que un usuario deba esperarse en el buffer a ser servido.

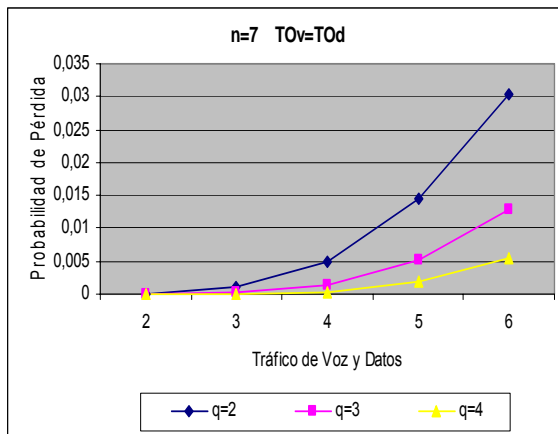
En este caso el  $TO_{max}$  también está limitado por la PB. Los valores de  $TO_{max}$  para una  $PB \leq 5\%$  podemos verlos en la tabla 3.5.

Buffer/Time Slots	7	8
2	3,7 Erlangs	4,2 Erlangs
3	3,7 Erlangs	4,2 Erlangs
4	3,7 Erlangs	4,2 Erlangs

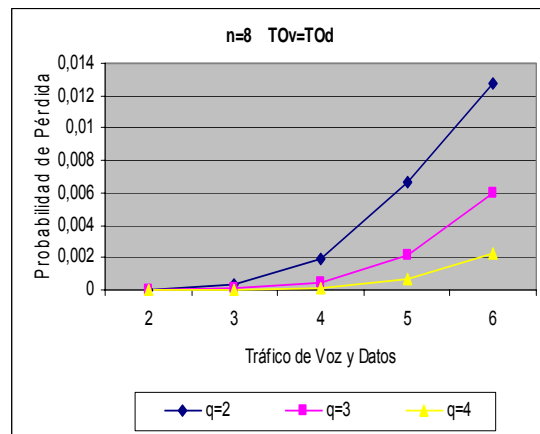
Tabla 3.5. Modelo 2: Valores de  $TO_{max}$  caso 2.

### 3.2.3 Caso 1: $TO_v = TO_d$

Por último analizaremos el caso donde el volumen de tráfico de voz es el mismo que el volumen de tráfico de datos. En la gráfica 3.16 y 3.17 está representada la probabilidad de pérdida para un sistema con 7 y 8 time slots respectivamente con un buffer de 2, 3 y 4 posiciones.



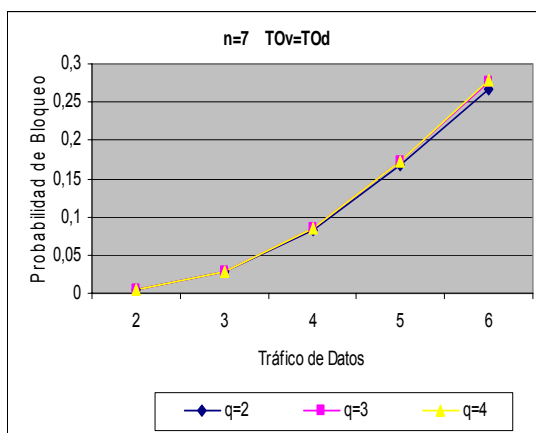
Gráfica 3.16. PP para n=7



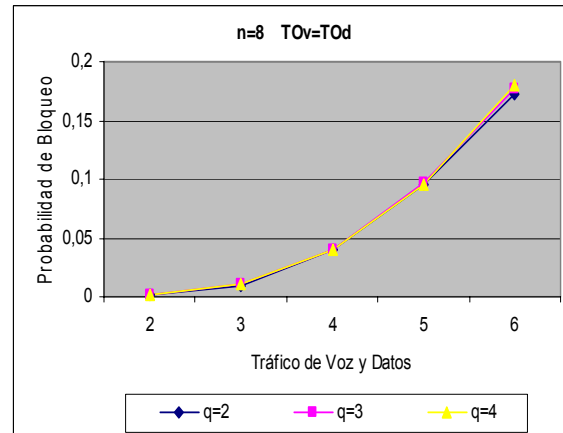
Gráfica 3.17. PP para n=8

Como podemos observar la evolución de la probabilidad tiene una forma casi de curva. Los valores más elevados de pérdida los obtenemos cuando el buffer es de  $q=2$  y oscilan entre el 0% y el 3% para el sistema con  $n=7$  time slots y entre un 0% y un 1,2% para el sistema con  $n=8$  time slots. Cuando aumentamos el buffer en dos posiciones, la PP desciende entre un 1,2% y un 3%. Estos valores están por debajo del 5% de pérdidas y son menores que en el caso anterior

En las gráficas 3.18 y 3.19 observamos la probabilidad de bloqueo para sistemas con 7 y 8 time slots respectivamente.



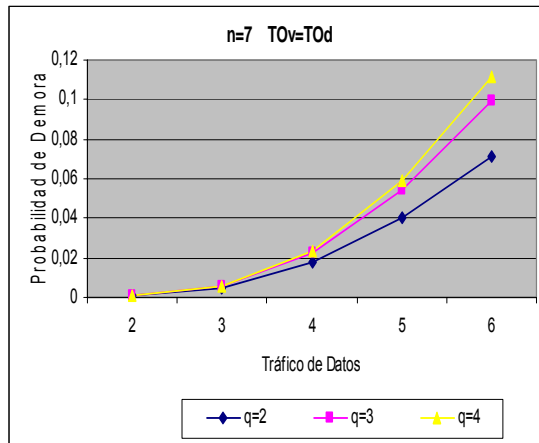
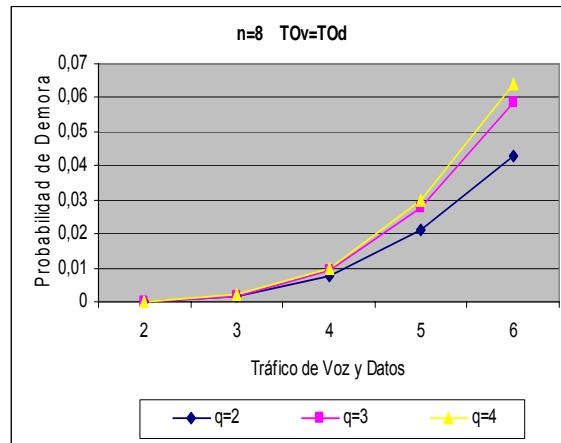
Gráfica 3.18 PB para n=7



Gráfica 3.19. PB para n=8

En las gráficas 3.18 y 3.19 podemos observar que el incremento de la probabilidad de bloqueo también tiene una forma de curva ascendente y no hay prácticamente diferencia cuando aumentamos el tamaño del buffer. Los valores oscilan entre el 0% y el 26% cuando el sistema tiene 7 time slots y entre el 0% y el 18% si el sistema es de 8 time slots. Estos valores de bloqueo son similares a los obtenidos en el caso anterior, lo cual nos dice que el hecho de aumentar el buffer no afecta a la probabilidad de bloqueo.

En las gráficas 3.20 y 3.21 está representada la probabilidad de demora para este caso.

Gráfica 3.20. PD con  $n=7$ Gráfica 3.21. PD con  $n=8$ 

En dichas gráficas podemos observar que el incremento de la probabilidad de demora tiene una forma de curva ascendente. Los valores más elevados los obtenemos cuando el buffer es de 4 posiciones y oscilan entre el 0% y el 11% cuando el sistema es de 7 time slots y entre el 0% y el 6% cuando el sistema es de 8 time slots. Cuando disminuimos el buffer en dos posiciones conseguimos disminuir la PD entre un 3% y un 4%. Estos valores son aceptables ya que están por debajo del 15%.

En este caso el  $TO_{max}$  también está limitado por la PB. Los valores de  $TO_{max}$  para una  $PB \leq 5\%$  podemos verlos en la tabla 3.6.

Buffer/Time Slots	7	8
2	3,4 Erlangs	4,1 Erlangs
3	3,4 Erlangs	4,1 Erlangs
4	3,4 Erlangs	4,1 Erlangs

Tabla 3.6. Modelo 2: Valores de  $TO_{max}$  caso 3.

Durante el análisis de este modelo de asignación secuencial con buffer hemos podido comprobar que el exceso de tráfico de datos afecta de manera negativa al comportamiento del sistema, haciendo que la probabilidad de bloqueo tenga un valor demasiado alto como para dar un GoS aceptable para el usuario.

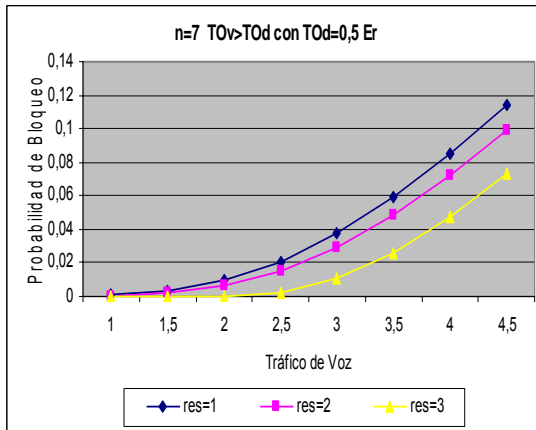
### 3.3 Resultados modelo 3

En este modelo nuestro sistema se compone por  $n$  time slots, de estos  $n$  time slots  $m$  de ellos estarán reservados para voz por lo que no podrán cursar tráfico de datos y  $n-m$  time slots estarán compartidos para tráfico de voz y datos. Además tendremos un buffer de  $q$  posiciones donde el tráfico de datos que haya encontrado todos los recursos ocupados esperará a ser servido.

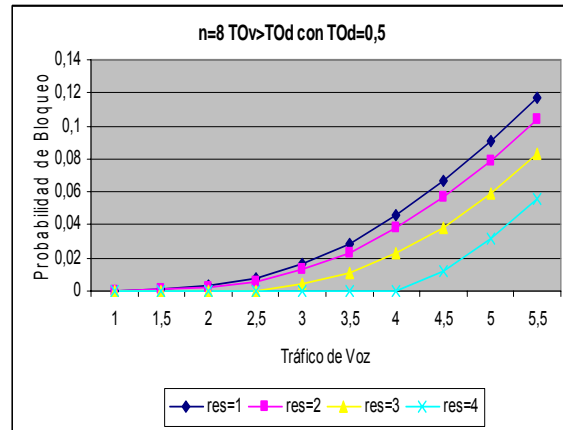
Definiremos la *probabilidad de bloqueo (PB)* como la probabilidad de que llegue tráfico al sistema y encuentre todos los time slots ocupados, la *probabilidad de pérdida de datos (PPD)* como la probabilidad de que llegue tráfico de datos al sistema y se pierda.

### 3.3.1 Caso 1: $TO_v > TO_d$

En las gráficas que mostraremos a continuación se representan la probabilidad de bloqueo y probabilidad de pérdida de datos cuando el tráfico de voz que llega al sistema es mayor que el tráfico de datos. En la gráfica 3.22 y 3.23 están representadas las probabilidades de pérdida para un sistema con 7 y 8 time slots.



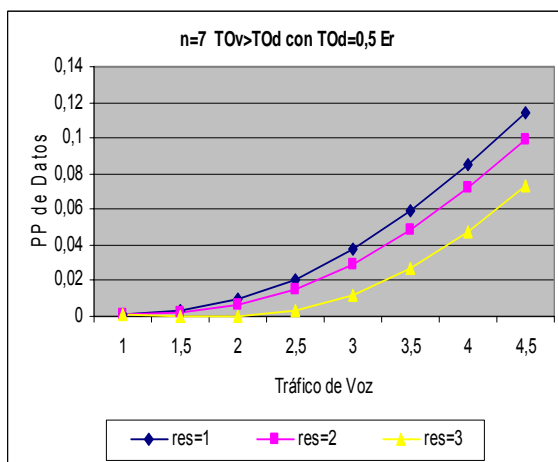
**Gráfica 3.22.** PB para n=7



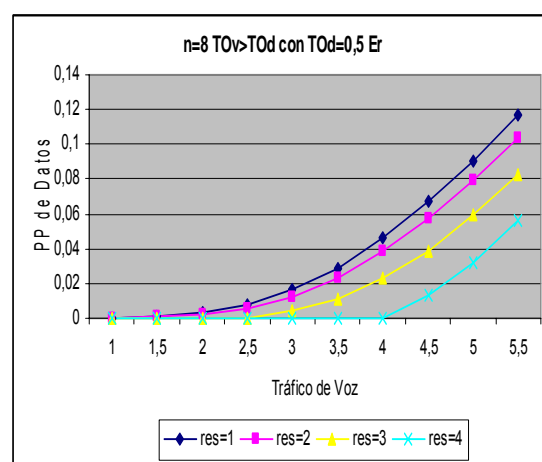
**Gráfica 3.23.** PB para n=8

El incremento de la probabilidad de bloqueo tiene una forma una forma de curva ascendente. Los valores más elevados los obtenemos cuando solo hay un time slot de reserva y oscilan entre el 0% y el 12% para ambos casos. Cuando amentamos la reserva de 1 a 3 time slots la PB desminuye en un 4% aproximadamente en ambos casos.

En las gráficas 3.24 y 3.25 están representadas las probabilidad de pérdida de datos para n= 7 y 8 time slots respectivamente.



**Gráfica 3.24.** PPD con n=7



**Gráfica 3.25.** PPD con n=8

Como podemos observar los valores y el incremento de la probabilidad de pérdida de datos son muy similares a los de las gráficas 3.22 y 3.23, tiene una forma de curva ascendente y el crecimiento disminuye cuando aumentamos el número de time slots reservados. Tiendo en cuenta estos valores podemos



decir que la probabilidad de que se pierda tráfico de voz (PB) es prácticamente igual a la probabilidad de que se pierda tráfico de datos (PPD), esto es debido a que el tráfico de datos está muy por debajo del tráfico que pueden cursar los time slots compartidos y, por tanto, la  $PPD \approx PB$ .

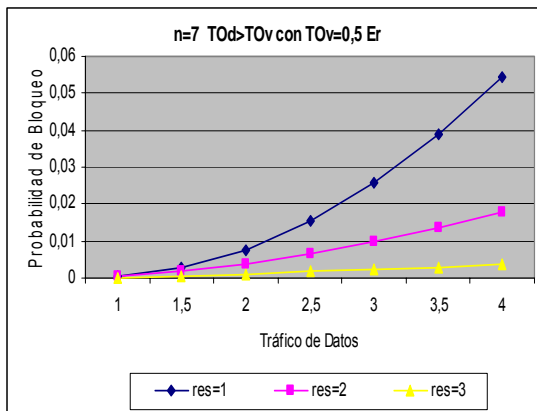
En este caso los valores PB son prácticamente iguales a los de PPD, teniendo en cuenta este dato los valores de  $TO_{max}$  para nuestro sistema los mostramos en la tabla 3.7.

Reserva/Time Slots	7	8
1	3,7 Erlangs	4,5 Erlangs
2	4 Erlangs	4,7 Erlangs
3	4,7 Erlangs	5,3 Erlangs
4	-----	5,7 Erlangs

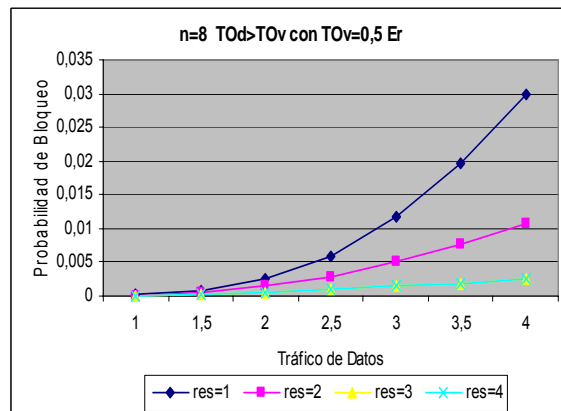
Tabla 3.7. Modelo 2: Valores de  $TO_{max}$  caso 1.

### 3.3.2 Caso 1: $TO_v < TO_d$

En las gráficas 3.26 y 3.27 se representa la probabilidad de bloqueo cuando el tráfico de datos es mayor que el tráfico de voz para sistemas con 7 y 8 time slots respectivamente.



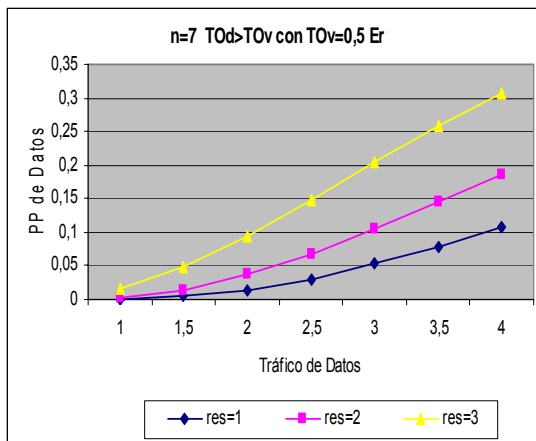
Gráfica 3.26. PB con n=7



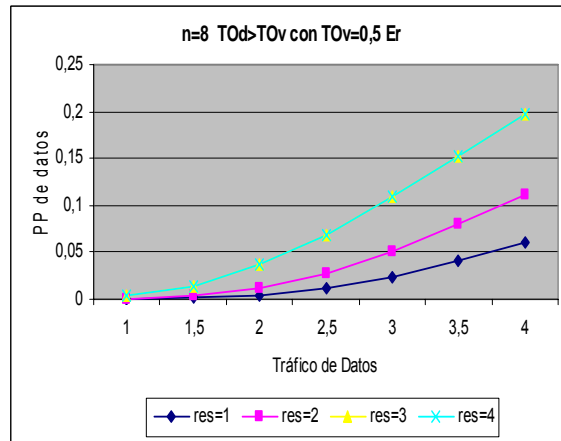
Gráfica 3.27. PB para n=8

En estas gráficas la probabilidad de bloqueo empieza teniendo una forma de curva ascendente y va tomando una forma lineal cuando aumentamos el número de time slots reservados. Los valores más elevados los obtenemos cuando la reserva es de 1 único time slot y oscila entre el 0% y el 5,5% para n=7 time slots y entre el 0% y el 3% para n=8 time slots. Cuando aumentamos la reserva a 3 time slots la PB disminuye hasta alcanzar valores próximos al 0%.

En las gráficas 3.28 y 3.29 observamos la probabilidad de pérdida de datos para los mismo sistemas anteriores.



Gráfica 3.28. PPD con n=7



Gráfica 3.29. PPD con n=8

En este caso la probabilidad de pérdida tiene un comportamiento casi lineal. El valor más elevado lo obtenemos cuando el número de reserva es de 3 o más time slots y los valores oscilan entre el 0% y el 30% cuando el sistema tiene 7 time slots y entre el 0% y el 20% cuando el sistema tiene 8 time slots. Cuando reducimos el número de de time slots reservados a 1 único time slot la PPD se reduce entre un 15% y un 20%. Es un comportamiento lógico, ya que cuantos menos time slots de reserva tengamos más time slots compartidos habrá disponibles para cursar tráfico de datos.

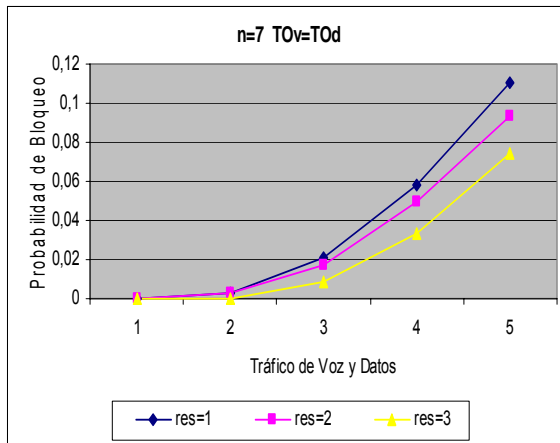
En este caso tenemos una PB aceptable para el tráfico de voz pero obtenemos una PPD demasiado elevada para el tráfico de datos, por lo tanto el valor que limita el  $TO_{max}$  del sistema (tabla 3.8) es la PPD.

Reserva/Time Slots	7	8
1	3,5 Erlangs	4 Erlangs
2	2,7 Erlangs	3,5 Erlangs
3	2 Erlangs	2,6 Erlangs
4	-----	2,6 Erlangs

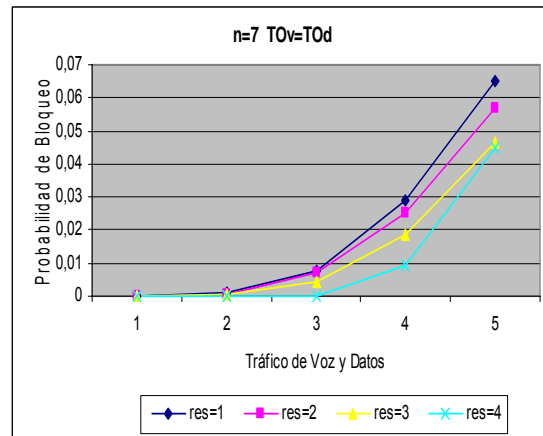
Tabla 3.8. Modelo 3: Valores de  $TO_{max}$  caso 2.

### 3.3.3 Caso 1: $TO_v = TO_d$

Por último pasaremos a analizar las gráficas el tercer caso, donde el volumen de tráfico de voz será igual al volumen de tráfico de voz. En las gráficas 3.30 y 3.31 se representa la PB para un sistemas con 7 y 8 time slots.



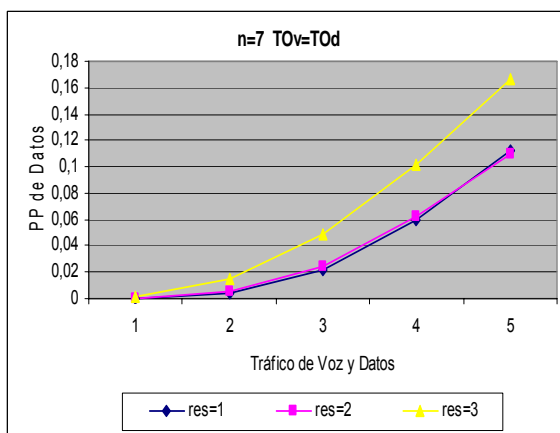
Gráfica 3.30. PB con n=7



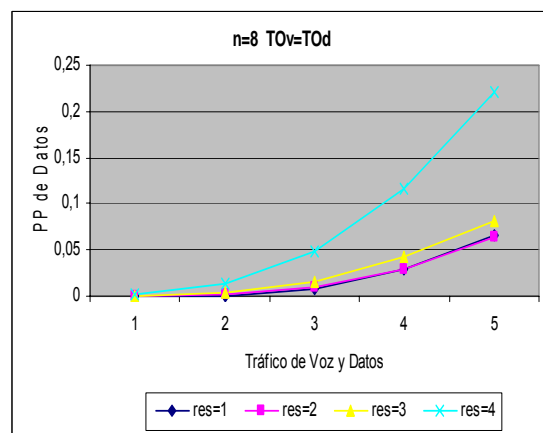
Gráfica 3.31. PB con n=8

La probabilidad de bloqueo en este caso tiene una forma de curva ascendente y cuando aumentamos la reserva hasta 4 time slots (la reserva es la mitad de los time slots del sistema) la PB crece bruscamente. Los valores más elevados los encontramos cuando la reserva es de 1 único time slot y los valores oscilan entre el 0% y el 11% para un sistema con 7 time slots y entre el 0% y el 7% para el sistema con n=8 time slots.

En las gráficas 3.32 y 3.33 se representa la probabilidad de pérdida de datos para los mismo sistemas anteriores.



Gráfica 3.32. PPD con n=7



Gráfica 3.33. PPD para n=8

Para el sistema con 7 time slots observamos que la PPD cuando la reserva es de 1 y 2 time slots son prácticamente iguales. Cuando aumentamos la reserva a 3 time slots la PPD puede aumentar hasta en un 4% obteniendo valores máximos que oscilan entre el 0% y el 16%. Para el sistema con 8 time slots los valores máximos los obtenemos cuando la reserva es de 4 time slots y oscilan entre el 0% y el 22%. Si decrementamos el valor de la reserva la PPD desciende hasta en un 14%.

Esto nos indica que en el caso en el que el volumen de tráfico de voz es igual al volumen de tráfico de datos el número de time slots reservados ha de ser menor que la mitad del número de time slots totales del sistema, en caso contrario la probabilidad de pérdida alcanza un aumento importante.

Nuevamente el valor de la PPD nos limita el valor del  $TO_{max}$  para nuestro sistema, los valores obtenidos los mostramos en la tabla 3.9.

Reserva/Time Slots	7	8
1	3,6 Erlangs	4,3 Erlangs
2	3,6 Erlangs	4,3 Erlangs
3	3 Erlangs	4 Erlangs
4	-----	3 Erlangs

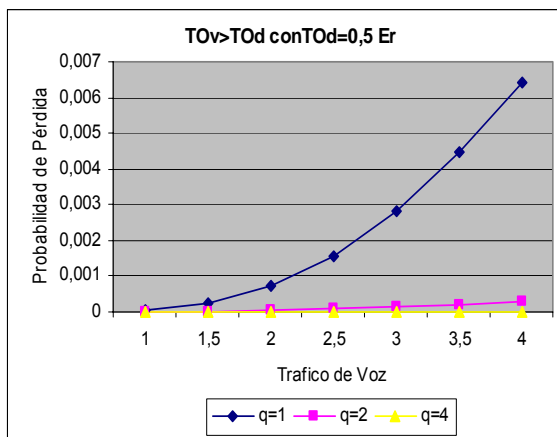
Tabla 3.9. Modelo 3: Valores de  $TO_{max}$  caso 3.

### 3.4 Resultados modelo 4

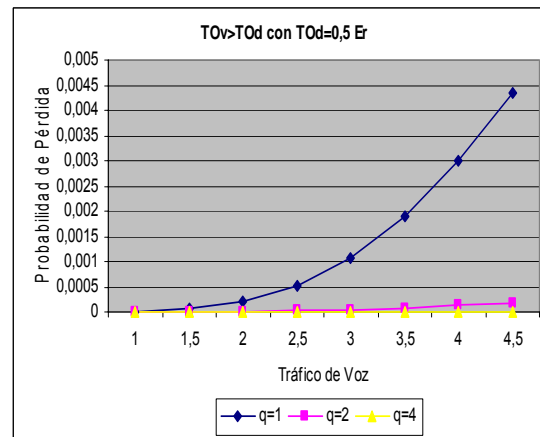
En este modelo nuestro sistema se compone por  $m$  time slots reservados para el tráfico de voz y  $n-m$  time slots compartidos para el tráfico de voz y datos. Además dispondremos de un buffer de  $q$  posiciones de buffer donde el tráfico de datos que haya encontrado todos los recursos ocupados esperará a ser servido. Por lo tanto definiremos la *probabilidad de bloqueo (PB)* como la probabilidad de que llegue tráfico al sistema y encuentre todos los time slots ocupados y la *probabilidad de pérdida (PP)* como la probabilidad de que llegue tráfico al sistema y se pierda.

#### 3.4.1 Caso 1: $TO_v > TO_d$

En las gráficas que mostraremos a continuación (gráficas 3.34 y 3.35) se representan la probabilidad de pérdida cuando el tráfico de voz que llega al sistema es mayor que el tráfico de datos para sistemas con 7 y 8 time slots respectivamente.



Gráfica 3.34. PP para  $n=7$



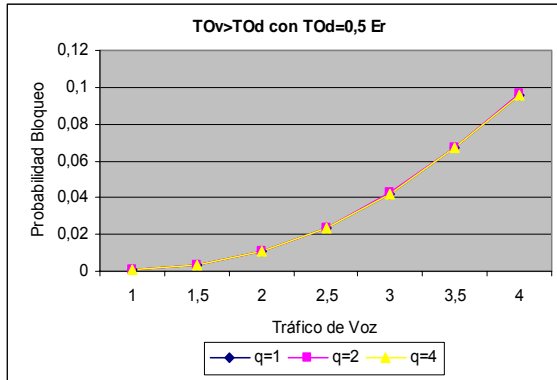
Gráfica 3.35. PP para  $n=8$

En este caso, la probabilidad de pérdida es igual tanto si la reserva es de 1, 2 o 3 time slots no hay variación en la forma de gráfica y los cambios en los valores obtenidos son prácticamente nulos.

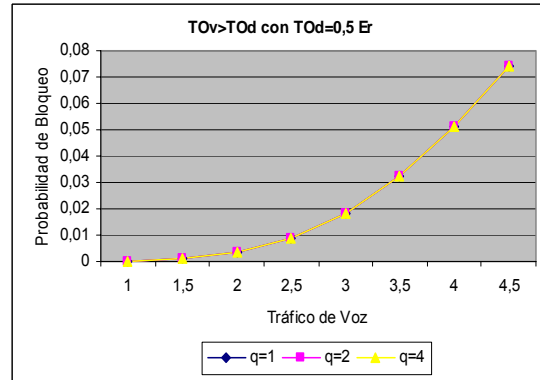
Como podemos observar la gráfica tiene un aumento de curva ascendente cuando el buffer es de 1 posición, obteniendo valores máximos que oscilan

entre el 0% y el 0,7% para el caso de  $n=7$  time slots y entre el 0% y el 0,45% para el sistema con 8 time slots. Si Aumentamos el tamaño del buffer a 2 o 4 posiciones la PP se reduce notablemente consiguiendo valores de pérdida cercanos al 0%.

En las gráficas 3.36 y 3.37 está representada la probabilidad de bloqueo para el mismo caso anterior.



Gráfica 3.36. PB para  $n=7$



Gráfica 3.37. PB para  $n=8$

El número de time slots reservados tampoco afecta al valor o la forma de las gráficas que representan la probabilidad de bloqueo.

Observamos en las gráficas 3.36 y 3.37 que el aumento de la PB tiene una forma de curva ascendente y prácticamente no hay diferencia al aumentar el buffer. Los valores oscilan entre el 0% y el 10% para el sistema con 7 time slots y entre el 0% y el 8% para el sistema con 8 time slots.

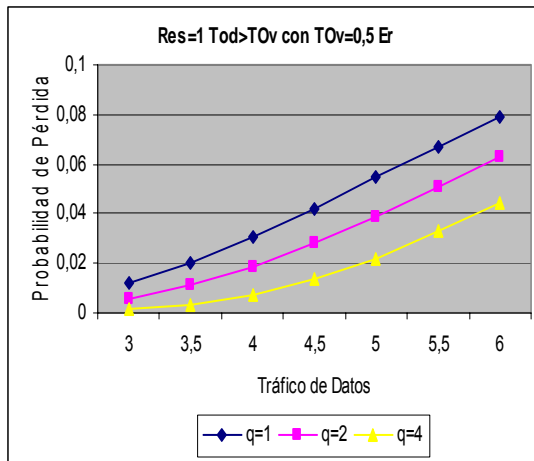
En este caso es la PB lo que limita el  $TO_{max}$  de nuestro sistema (Tabla 3.10), ya que los valores obtenidos de PP son menos restrictivos.

	7 Time Slots			8 Time Slots		
	$q=1$	$q=2$	$q=4$	$q=1$	$q=2$	$q=4$
Reserva=1	3,7 Er	3,7 Er	3,7 Er	4,5 Er	4,5 Er	4,5 Er
Reserva=2	3,7 Er	3,7 Er	3,7 Er	4,5 Er	4,5 Er	4,5 Er
Reserva=3	3,7 Er	3,7 Er	3,7 Er	4,5 Er	4,5 Er	4,5 Er
Reserva=4	-----	-----	-----	4,5 Er	4,5 Er	4,5 Er

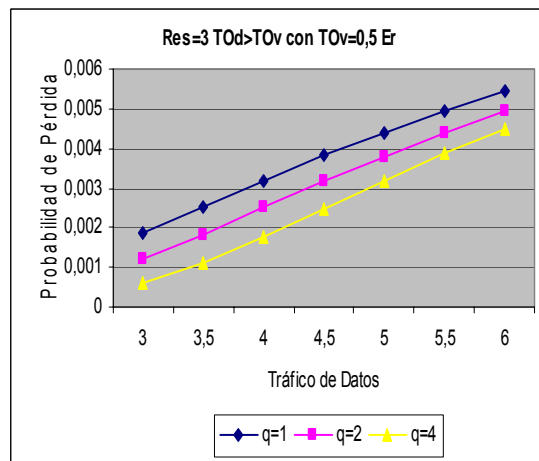
Tabla 3.10. Modelo 4: Valores de  $TO_{max}$  caso 1.

### 3.4.2 Caso 1: $TO_v < TO_d$

En las gráficas 3.38 y 3.39 se representa la probabilidad de pérdida cuando el tráfico de datos es mayor que el tráfico de voz para sistemas con 7 y en las gráficas 3.40 y 3.41 la probabilidad de pérdida para un sistema con 8 time slots.

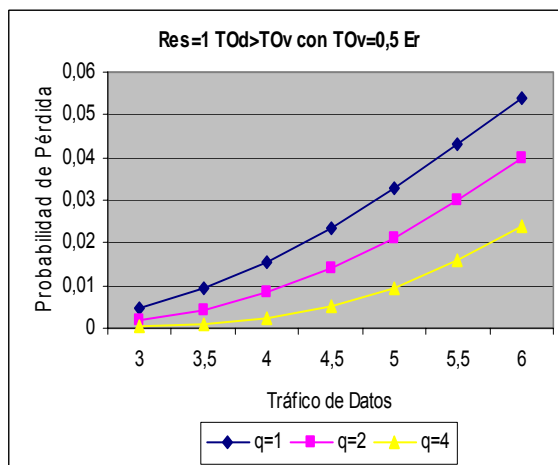


Gráfica 3.38. PP para n=7 y reserva=1.

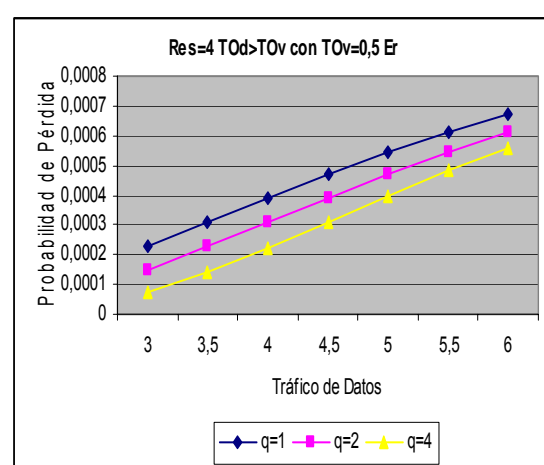


Gráfica 3.39. PP para n=7 y reserva=3.

En la gráfica 3.38 donde la reserva es de 1 time slot observamos que el aumento de la PP es casi lineal. Los valores más elevados los obtenemos cuando el buffer es de una posición y oscila entre el 1% y el 8%. Si aumentamos el buffer a 4 posiciones la PP se reduce al intervalo comprendido entre un 1 y un 4%. En cambio en la gráfica 3.39 donde la reserva es de 3 time slots la PP es 10 veces menor.



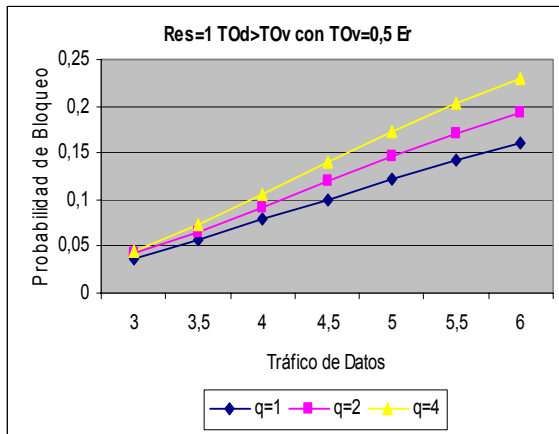
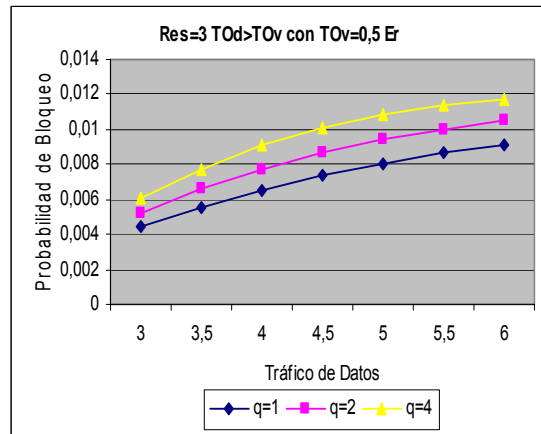
Gráfica 3.40. PP para n=8 y reserva=1.



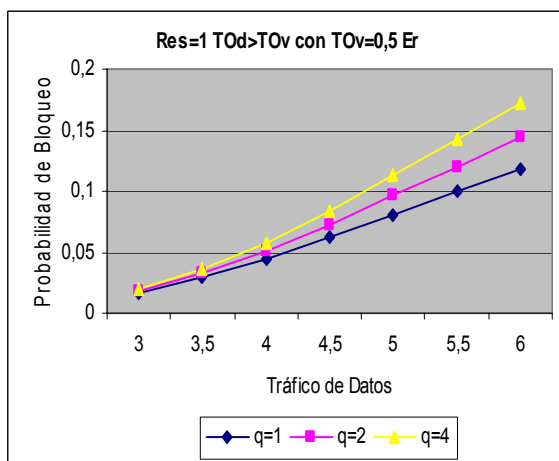
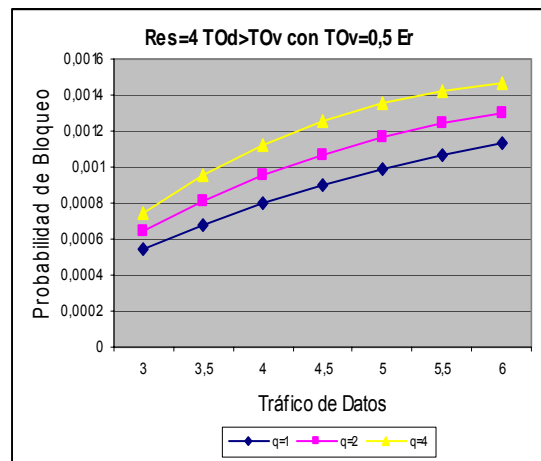
Gráfica 3.41. PP para n=8 y reserva=4.

En la gráfica 3.40 con reserva de un único time slot, el aumento de la PP tiene forma de curva ascendente. Los valores más elevados los encontramos cuando el buffer es de 1 posición y oscilan entre el 0% y el 6%. Cuando aumentamos el buffer a 4 posiciones la PP se reduce entre un 0% y un 4%. En cambio en la gráfica 3.42 donde la reserva es de 4 time slots, el aumento de la PP es casi lineal y los valores de pérdida son 100 veces menores que con 1 solo time slot de reserva.

En las gráficas 3.42 y 3.43 se representa la probabilidad de pérdida cuando el tráfico de datos es mayor que el tráfico de voz para sistemas con 7 y en las gráficas 3.44 y 3.45 la probabilidad de pérdida para un sistema con 8 time slots.

Gráfica 3.42. PB para  $n=7$  y reserva=1.Gráfica 3.43. PB para  $n=7$  y reserva=3.

En la gráfica 3.42 donde la reserva es de 1 time slot el aumento de la PB es lineal. Los valores máximos los obtenemos cuando el buffer es de 4 posiciones y oscilan entre el 4% y el 25%. Si aumentamos la reserva a 3 time slots (gráfica 3.43) el aumento de la PB toma una forma de curva descendente y los valores máximos oscilan entre el 0,6% y el 1,2%.

Gráfica 3.44. PB para  $n=8$  y reserva=1.Gráfica 3.45. PB para  $n=8$  y reserva=4.

Estas gráficas para un sistema con 8 time slots son muy similares a las anteriores (3.32 y 3.43) aunque la PB es un 5% menor cuando la reserva es de 1 time slot y un 10% menor cuando la reserva es de 4 time slots.

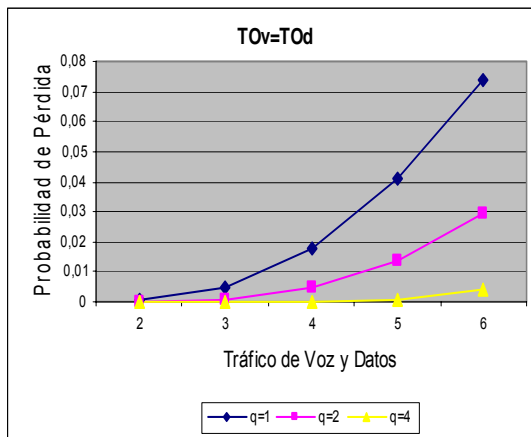
En este caso el valor de la reserva si que influye tanto en la PP como en la PB, aunque el valor que limita el  $TO_{max}$  a nuestro sistema sigue siendo el valor de PB. En la tabla 3.11 observamos los valores de  $TO_{max}$  para este caso.

	7 Time Slots						8 Time Slots					
	$q=1$		$q=2$		$q=4$		$q=1$		$q=2$		$q=4$	
Reserva=1	4	Er	4	Er	4	Er	4	Er	4	Er	4	Er
Reserva=2	6	Er	5,5	Er	5	Er	6,5	Er	6,5	Er	6	Er
Reserva=3	6,5	Er	6,5	Er	6,5	Er	6,5	Er	6,5	Er	6,5	Er
Reserva=4	-----		-----		-----		6,5	Er	6,5	Er	6,5	Er

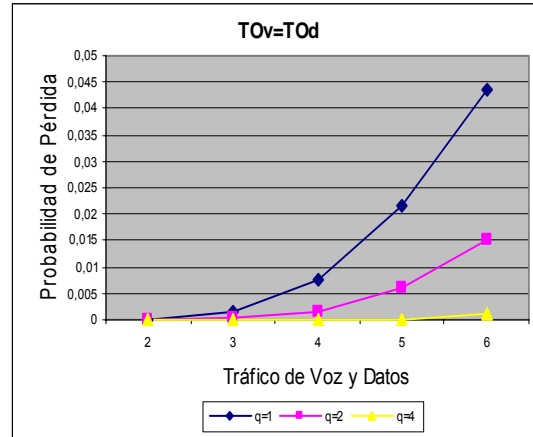
Tabla 3.11. Modelo 4: Valores de  $TO_{max}$  caso 2.

### 3.4.3 Caso 1: $TO_v = TO_d$

En las gráficas que mostraremos a continuación (gráficas 3.45 y 3.46) se representa la probabilidad de pérdida cuando el tráfico de voz que llega al sistema es igual que el tráfico de datos para sistemas con 7 y 8 time slots respectivamente.



**Gráfica 3.46.** PP para n=7

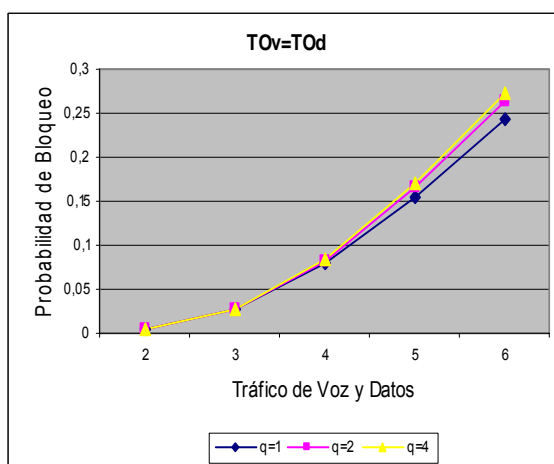


**Gráfica 3.47.** PP para n=8

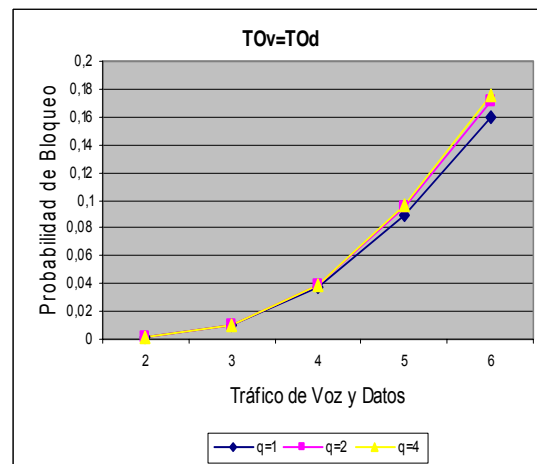
En este caso, la probabilidad de pérdida es igual tanto si la reserva es de 1, 2 o 3 time slots no varía la forma de gráfica y los cambios en los valores son prácticamente nulos.

Como podemos observar la gráfica tiene un aumento de curva ascendente cuando el buffer es de 1 posición, obteniendo valores máximos que oscilan entre el 0% y el 8% en el caso de un sistema con 7 time slots y entre el 0% y el 4,5% para un sistema con 8 time slots.

En las gráficas 3.48 y 3.49 está representada la probabilidad de bloqueo para el mismo caso anterior.



**Gráfica 3.48.** PB para n=7



**Gráfica 3.49.** PB para n=8

El número de time slots reservados tampoco afecta al valor o la forma de las gráficas que representan la probabilidad de bloqueo.



Observamos en las gráficas 3.48 y 3.49 que el aumento de la PB tiene una forma de curva ascendente y prácticamente no hay diferencia al aumentar el buffer. Los valores oscilan entre el 0% y el 30% para el sistema con 7 time slots y entre el 0% y el 18% para el sistema con 8 time slots.

En este caso es la PB lo que limita el  $TO_{max}$  de nuestro sistema (Tabla 3.12), ya que los valores obtenidos de PP son menos restrictivos.

	7 Time Slots			8 Time Slots		
	$q=1$	$q=2$	$q=4$	$q=1$	$q=2$	$q=4$
Reserva=1	3,5 Er	3,5 Er	3,5 Er	4,5 Er	4,5 Er	4,5 Er
Reserva=2	3,5 Er	3,5 Er	5,5 Er	4,5 Er	4,5 Er	4,5 Er
Reserva=3	3,5 Er	3,5 Er	3,5 Er	4,5 Er	4,5 Er	4,5 Er
Reserva=4	-----	-----	-----	4,5 Er	4,5 Er	4,5 Er

**Tabla 3.12.** Modelo 4: Valores de  $TO_{max}$  caso 2.

## CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

Tras evaluar todos los resultados obtenidos por medio de las dos disciplinas de servicio descritas anteriormente, obtenemos las siguientes conclusiones:

**Modelo 1:** El tipo de tráfico que llega a nuestro sistema no afecta a la probabilidad de pérdida o probabilidad de bloqueo, éstas solo se ven afectadas por el volumen total de tráfico que llega al sistema y por los recursos de los que se disponga para cursarlo.

**Modelo 2:** Cuando el tráfico de voz es mayor que el tráfico de datos el hecho de tener un *buffer* con un número de posiciones alto hace disminuir la PP, PB y PD. Si el tráfico de voz es menor o igual al tráfico de datos, la probabilidad de bloqueo y la probabilidad de demora aumentan si aumentamos el *buffer*. De manera que dependiendo del tipo de tráfico que nos llegue al sistema tendremos:

- $TO_v > TO_d$ : *buffer* con número de posiciones alto
- $TO_v < TO_d$ : *buffer* con número de posiciones bajo
- $TO_v \approx TO_d$ : *buffer* con número de posiciones bajo

**Modelo 3:** Cuando el tráfico de voz es mayor que el tráfico de datos, el hecho de tener un número elevado de time slots reservados hace que la probabilidad de pérdida de voz y datos disminuya. Si el tráfico de voz es menor o igual al tráfico de datos tener muchos time slots de reserva hace que la probabilidad de pérdida de voz disminuya y la probabilidad de pérdida de datos aumente. De manera que nuestro sistema deberá tener en cuenta el tipo de tráfico de la siguiente manera:

- $TO_v > TO_d$ : reserva elevada. El número de time slots reservados ha de ser menos de la mitad de los time slots totales del sistema.
- $TO_v < TO_d$ : número pequeño de time slots de reserva.
- $TO_v \approx TO_d$ : número pequeño de time slots de reserva

**Modelo 4:** Cuando el tráfico de voz es mayor o igual al tráfico de datos el número de time slots reservados no influye en la probabilidad de pérdida de voz (PB) ni en la probabilidad de pérdida de datos (PP), en cambio tener un *buffer* grande hace que la probabilidad de bloqueo y de pérdida disminuya. Cuando el tráfico de voz es menor que el tráfico de datos tener muchos time slots de reserva y un *buffer* grande hace que la probabilidad de pérdida de datos disminuya, tener una reserva grande y *buffer* pequeño hace que disminuya la probabilidad de pérdida de voz. De manera que dependiendo del tipo de tráfico que nos llegue al sistema tendremos:

- $TO_v > TO_d$ : *buffer* con mayor número de posiciones alto
- $TO_v < TO_d$ : reserva con un número alto de time slots
- $TO_v \approx TO_d$ : *buffer* con mayor número de posiciones alto.

## **CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE AMBIENTALIZACIÓN**

Las redes móviles celulares pueden tener un impacto medioambiental en cuanto a la ubicación de los subsistemas de estaciones móviles, no obstante nuestro trabajo no está centrado en la planificación de estas redes, sino más bien en una optimización interna de la gestión de los recursos radio, por tanto , no añade ningún tipo de impacto ambiental.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Ramírez , S. P. Mansilla, J. Paradells, “*Improving EDGE for rural enviroment though channel allocation for voice and data traffic*”, Carlos M. Ramírez Casañas, Josep Paradells Aspás, Sònia P. Mansilla, Proceedings of the 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC'07), San Juan, Puerto Rico, February 2007
- [2] M. Dillinger, K. Mandani y N. Alonistioti, “*Software defined radio: achitectures, systems and functions*”. Ed. John Wiley & Sons, Ltd (2003).
- [3] G. Heine, H. Sagkob, “GPRS. Gateway to third generation mobile networks”. Ed. Artech-House (2003).
- [4] J. Colell, “TFC: Software de gestión en redes móviles”. Universidad Politécnica de Cataluña (2006).
- [5] J. Hesselbach, “*Análisis de redes y sistemas de comunicaciones*”. Ediciones UPC (2002).

